

**CONTRIBUIÇÕES DA GEOANÁLISE E DO APRENDIZADO
DE MÁQUINAS NA AVALIAÇÃO SISTÊMICA DO VALE DA
FELICIDADE (RS).**

Alline Gomes Lamenha e Silva

Porto Alegre
Novembro de 2022

ALLINE GOMES LAMENHA E SILVA

**CONTRIBUIÇÕES DA GEOANÁLISE E DO APRENDIZADO
DE MÁQUINAS NA AVALIAÇÃO SISTÊMICA DO VALE DA
FELICIDADE (RS).**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
Novembro de 2022

ALLINE GOMES LAMENHA E SILVA

**CONTRIBUIÇÕES DA GEOANÁLISE E DO APRENDIZADO
DE MÁQUINAS NA AVALIAÇÃO SISTÊMICA DO VALE DA
FELICIDADE (RS).**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de novembro de 2022.

Prof. Miguel Aloysio Sattler
PhD. pela University of Sheffield/ UK
Orientador

**Prof.a Ângela de Moura Ferreira
Danilevicz**
Coordenadora do PPGCI

Prof. Maurício Carvalho Ayres Torres
Dr. pela Universitat Politècnica de
Catalunya

Prof.a Mônica Regina Garcez
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof.a Nirce Saffer Medvedovski
Dra. pela Universidade de São Paulo

Prof.a Rosa Maria Locatelli Kalil
Dra. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho à memória de Roldão Oliveira, um homem da razão e da justiça, e de Elizabeth Lamenha, toda ela flor e amor. Minha gratidão pela chance de ter dividido com vocês “um planeta e uma época”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de Alagoas, por conceder o tempo e as condições necessárias à reflexão científica, tornando possível essa imersão, mesmo em anos de turbulência.

Agradeço ao professor Miguel Aloysio Sattler, pela generosa confiança, que a mim possibilitou o encantamento pelo objeto de estudo. E pela visão de mundo compartilhada, sempre tão rica e inspiradora.

Agradeço aos professores Eugenia Kuhn, Leandro Andrade, Luiz Carlos Pinto Silva Filho, Maria Conceição Scussel, Nirce Medvedovski, Rosa Maria Locatelli e Rualdo Menegat, pelas contribuições importantes na etapa de qualificação deste trabalho.

Agradeço ao professor Maurício Torres, pelas valiosas conversas, oportunidades e pelo apoio acadêmico.

Agradeço ao Celso, pela paciente e amorosa companhia de todos esses anos, por ser lar em todos esses lugares. E, também, claro, pelos brilhantes *insights* acadêmicos.

Agradeço aos meus pais, Antonio Carlos e Maria das Graças, e à minha irmã, Danielli, pela incansável torcida. E à Malu, minha musa inspiradora e o motivo pela luta por um melhor amanhã.

Nada é mais poderoso do que uma ideia cujo tempo
chegou.

Victor Hugo

RESUMO

SILVA, A. G. L. Contribuições da Geoanálise e do Aprendizado de Máquinas na Avaliação Sistêmica do Vale da Felicidade (RS). 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

As cidades são sistemas nos quais está presente a interação entre diversos aspectos, tais como a dinâmica social e territorial, a economia e a infraestrutura. Uma vez que tais elementos se influenciam mutuamente, existem limitações em tentar gerenciar a vida urbana observando apenas um de seus subsistemas, sendo tal abordagem eficaz apenas pontualmente. Nesse sentido, é fundamental que o estudo do ambiente urbano esteja vinculado a uma visão que, de forma conceitual ou aplicada, considere sua caracterização enquanto um sistema de complexidade organizada e possibilite sua gestão com a flexibilidade necessária, tanto para sua adaptação, como para a redução de suas vulnerabilidades. Novas tecnologias computacionais, envolvendo uma enorme quantidade de dados, bem como uma capacidade de processamento sem precedentes, assumem um papel inovador no entendimento desses problemas, como um ferramental de grande valia no sentido de revelar padrões anteriormente não identificáveis por meio da análise tradicional. Nessa direção, buscou-se, então, aplicar tais tecnologias de baixo custo para avaliar sistemas urbanos complexos, no contexto de municípios de pequeno porte. À luz de teorias clássicas sobre sustentabilidade, o **objetivo** da presente pesquisa foi propor uma estrutura-piloto para a avaliação de subsistemas urbanos, em pequenas e médias municipalidades brasileiras. A região do Vale do Caí (RS) foi selecionada como área de estudo. Como **metodologia**, fez-se uso de técnicas associadas à geoestatística, inteligência artificial e mineração de dados, com base em informações disponíveis para todo o território nacional, o que possibilitou avaliar: a ocupação do território, em termos de densidades populacionais e da rede das cidades que compõem a área de estudo; a ocupação socioespacial, identificando padrões espaciais de inclusão e exclusão social; a paisagem regional, em termos do índice de vegetação, do índice de área construída, da capacidade de sequestro de carbono pela vegetação e da evolução do campo térmico; a paisagem intraurbana, em termos do uso e ocupação do solo e das métricas da paisagem; e a relação multiescalar das variáveis estudadas. Tais estudos compuseram uma estrutura-piloto, cujo roteiro metodológico é passível de reprodução para qualquer das municipalidades brasileiras. A qualificação e quantificação das relações entre os subsistemas urbanos estudados foi consolidada em um estudo integrador, que possibilitou o aprofundamento da compreensão sobre o sistema alimentar urbano na área de estudo. Por fim,

o aplicativo web “SIG Vale da Felicidade” foi desenvolvido, constituindo um importante subproduto dos estudos elaborados para o Vale da Felicidade e possibilitando o acesso a todas as camadas de informação georreferenciada produzidas. As técnicas utilizadas mostraram-se úteis no sentido de considerar, de forma prática, a complexidade organizada das temáticas que envolvem a cidade. Em termos de resultados, o trabalho pretende contribuir com um roteiro metodológico para o tratamento do tema, como também no aprofundamento de estudos sobre a natureza complexa dos estudos urbanos. Entende-se que tais estudos representam uma contribuição, tanto na tomada de decisão orientada por dados, quanto no direcionamento do sistema à sustentabilidade e na condução das comunidades à uma redução de sua vulnerabilidade.

Palavras-chave: sistemas urbanos complexos; geotecnologias; inteligência artificial; mineração de dados; sustentabilidade urbana.

ABSTRACT

SILVA, A. G. L. Contribuições da Geoanálise e do Aprendizado de Máquinas na Avaliação Sistêmica do Vale da Felicidade (RS). 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

Cities are systems in which the interaction between various aspects is present, such as the social and territorial dynamics, the economy, and the infrastructure. As such elements influence each other, there are limitations in managing urban life by considering only one of its subsystems, which is effective only punctually. Therefore, it is fundamental to link the study of the urban environment to a vision that, in a conceptual or applied approach, considers its characterization as a system of organized complexity and enables its management with the required flexibility, both for adaptation and vulnerability reduction. New computational technologies involving big data and unprecedented processing capacity assume an innovative role in comprehending these problems as a valuable tool to reveal patterns previously unidentifiable by traditional analysis. Thus, this study aimed to apply these low-cost technologies to evaluate complex urban systems in the context of small-sized municipalities. In light of classical sustainability theories, the **objective** of this research was to propose a pilot structure for evaluating urban subsystems in small and medium-sized Brazilian municipalities. The Vale do Caí region (RS) was selected as the area to be studied. In terms of **methodology**, techniques associated with geo-statistics, artificial intelligence, and data mining, based on information available for the Brazilian territory, were used to evaluate: territory occupation, both in terms of population densities and cities network in the study area; socio-spatial occupation, identifying spatial patterns of social inclusion and exclusion; regional landscape, in terms of the vegetation index, built-up area index, carbon capture capacity of vegetation, and evolution of the thermal field; intra-urban landscape, in terms of land use and occupation and landscape metrics; and the multiscale relationship of the analyzed variables. These studies comprised a pilot structure that can be reproduced for any Brazilian municipality. The relationships among the studied urban subsystems were integrated in a study, which enable the comprehension of the urban food system in the study area. At last, the web application "GIS Vale da Felicidade" was developed, illustrating the elaborated studies developed in the Vale da Felicidade and enabling access to all layers of georeferenced information produced. The techniques used have proven helpful as a way of better understanding the organized complexity of urban issues. In terms of **results**, the work aims to contribute, as a methodological guide, for further studies aimed at better

understanding the complex nature of urban studies, thus contributing to data-driven decision-making, aiming at directing such systems to a higher degree of sustainability and enabling communities to increase their resilience.

Keywords: complex urban systems; geotechnology; artificial intelligence; data mining; urban sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 ELABORANDO O PROBLEMA.....	25
1.2 QUESTÕES DA PESQUISA.....	27
1.3 HIPÓTESES DE TRABALHO.....	28
1.4 PROPÓSITOS DA INVESTIGAÇÃO	28
1.5 ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO	30
2 METODOLOGIA	31
2.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	31
2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	35
2.3 ESTRUTURA DA TESE	41
3 O PENSAMENTO SISTÊMICO NO ESTUDO DO AMBIENTE URBANO: CONCEITOS, FERRAMENTAS E DESAFIOS	42
3.1 COMPREENDENDO AS CIDADES COMO SISTEMAS COMPLEXOS.....	42
3.1.1 As cidades como sistemas vivos	43
3.1.2 A completude dos sistemas vivos.....	49
3.1.3 Relações entre a resiliência e a vivacidade dos sistemas urbanos	60
3.1.4 Considerações sobre o pensamento sistêmico aplicado ao estudo do ambiente urbano	66
3.2 FERRAMENTAS NA ANÁLISE DOS SISTEMAS URBANOS	68
3.2.1 Sistemas urbanos complexos na abordagem orientada por dados	71
3.2.2 Geotecnologias e o estudo de sistemas urbanos.....	81
3.2.3 Metodologias para a avaliação da resiliência urbana.....	88
3.2.4 Considerações sobre as ferramentas para análise dos sistemas urbanos 95	
4 ESTUDO DE CASO: O VALE DA FELICIDADE.....	99
5 ANÁLISE EXPLORATÓRIA: ESTUDOS POSSÍVEIS	115
5.1 OCUPAÇÃO DO TERRITÓRIO	115
5.1.1 Detalhamento da metodologia.....	117
5.1.2 Densidade e sustentabilidade.....	121

5.1.3	Rede de cidades	134
5.2	INCLUSÃO SOCIAL NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: UMA ANÁLISE SOCIOESPACIAL.....	140
5.2.1	A heterotopia da inclusão social.....	141
5.2.2	Detalhamento da metodologia.....	143
5.2.2.1	Mapa da Inclusão/Exclusão Social.....	143
5.2.2.2	Identificação de Padrões Locais	149
5.2.3	Análise dos Padrões de Inclusão Socioespacial	150
5.2.3.1	Mapa da Inclusão/Exclusão Social.....	150
5.2.3.2	Identificação de Padrões Locais	157
5.2.3.3	Aplicabilidade da análise socioespacial	159
5.3	ANÁLISE DA PAISAGEM.....	159
5.3.1	Avaliação na Escala Regional	160
5.3.1.1	Detalhamento da metodologia.....	163
5.3.1.1.1	<i>Aquisição de imagens e pré-processamento.....</i>	<i>163</i>
5.3.1.1.2	<i>Índice de Vegetação, de Sequestro de Carbono, de Área Construída e de Temperaturas Superficiais.....</i>	<i>166</i>
5.3.1.1.3	<i>Detecção de Mudanças.....</i>	<i>168</i>
5.3.1.1.4	<i>Identificação de Padrões Emergentes</i>	<i>169</i>
5.3.1.2	Mapeamento do Índice de Vegetação, de Sequestro de Carbono, de Área Construída e de Temperaturas Superficiais.....	170
5.3.1.3	Índice de Detecção de Mudanças	180
5.3.1.4	Identificação de Padrões Locais Emergentes	183
5.3.2	Avaliação na Escala Intraurbana	190
5.3.2.1	Detalhamento da Metodologia.....	191
5.3.2.2	Mapeamento das Classes de Uso e Cobertura do Solo e Análise da Paisagem.....	197
5.3.2.3	Métricas da Paisagem	205
5.3.3	Análise Multiescalar: do Regional ao Intraurbano.....	221
5.3.3.1	Detalhamento da metodologia.....	222
5.3.3.2	Identificação de gradientes	227
5.3.3.3	Análise da temperatura superficial e do sequestro de carbono pela vegetação, nas diferentes classes de uso do solo.....	230
5.3.3.4	Análise exploratória.....	235
5.3.3.5	Identificação de Padrões Complexos.....	238
5.4	SISTEMAS ALIMENTARES URBANOS	252

5.4.1	Detalhamento da metodologia.....	254
5.4.2	Produção hortícola no Vale da Felicidade.....	259
5.4.3	Conexão urbano-rural na produção hortícola.....	271
5.4.4	Potencial de produção urbana de alimentos	275
6	APLICATIVO WEB: SIG VALE DA FELICIDADE	306
7	CONCLUSÕES	309
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	309
7.2	UMA CIDADE NÃO É UMA ÁRVORE: REFLEXÕES SOBRE A VIVACIDADE DOS SISTEMAS URBANOS	318
7.3	LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS.....	321
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	324
	APÊNDICE A	340

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das unidades de análise da paisagem: a) regional; b) local e; c) intraurbana.	32
Figura 2: Estrutura-piloto para a avaliação de subsistemas urbanos, em pequenas municipalidades brasileiras.	34
Figura 3: Delineamento da pesquisa.	35
Figura 4: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para avaliação da ocupação do território.	37
Figura 5: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para avaliação da inclusão social no ambiente construído.	38
Figura 6: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para a análise da paisagem, nas escalas regional e local.	39
Figura 7: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para o estudo do sistema alimentar urbano.	40
Figura 8: Modos de reflexão para a compreensão das cidades.	45
Figura 9: Diagramas de organização de conjuntos em a) semitrama; e b) árvore.	46
Figura 10: Atributos integrados de um bairro sustentável.	49
Figura 11: Resumo esquemático das 15 propriedades fundamentais dos sistemas vivos.	51
Figura 12: Padrão de distribuição de cidades.	54
Figura 13: Dimensões de desempenho, para a boa forma da cidade.	55
Figura 14: Relação entre os atributos de resiliência e as propriedades dos sistemas vivos.	62
Figura 15: Estágios da busca pela resiliência urbana, a curto, médio e longo prazos.	64
Figura 16: Etapas da compreensão de um fenômeno com base em dados.	74
Figura 17: Fluxo ilustrativo da técnica de aprendizado de máquinas <i>k-means</i>	77
Figura 18: Fluxo ilustrativo de uma Rede Neural.	78
Figura 19: Fatores influenciando os dados obtidos por sensoriamento remoto.	84
Figura 20: Resultados da revisão sistemática, quanto às palavras-chave utilizadas.	89
Figura 21: Quantitativo de trabalhos selecionados pelos critérios de inclusão.	90
Figura 22: Artigos selecionados.	91

Figura 23: Abordagem dos artigos selecionados.....	92
Figura 24: Localização das áreas de estudos, nos artigos selecionados.....	93
Figura 25: Localização do Vale do Caí (RS).....	100
Figura 26: a) Placa indicativa do trajeto, no Vale da Felicidade, no município de Barão; b) centro do município de São Sebastião do Caí; c) centro do município de Harmonia; d) rua no município de Bom Princípio.....	103
Figura 27: a) Cascata dos Bugres, no município de Alto Feliz; b) centro do município de São Sebastião do Caí; c) Parque Municipal de Feliz; d) centro do município de Feliz.....	104
Figura 28: a) Estimativa populacional dos municípios, em 2020 e b) Evolução da população, PIB e PIB <i>per capita</i> , entre os anos de 2002 e 2017, na região do Vale da Felicidade.....	105
Figura 29: VAB dos setores agropecuário, industrial, de serviços; impostos sobre produtos; PIB e PIB per capita, por município, na região do Vale da Felicidade.	106
Figura 30: População Urbana e Rural, nos anos de 1991, 2000, 2010 e 2019, nos municípios do Vale da Felicidade.....	107
Figura 31: Criação de novos municípios no Vale da Felicidade, desde 1873, com ilustração da subdivisão territorial, a partir de 1992.	109
Figura 32: Vocações do Vale da Felicidade.	110
Figura 33: Hidrografia na região do Vale do Caí (RS).....	111
Figura 34: Relevo do Vale do Rio Caí: a) altitudes, b) declividades e c) sumário de altitudes e declividades, por município.....	112
Figura 35: Eventos de cheias que atingiram alguns dos municípios do Vale da Felicidade, entre 2003 e 2008, causando danos significativos.....	113
Figura 36: Estratégias de desenvolvimento regional no Vale do Rio Caí.....	114
Figura 37: Eficiência urbana, em diferentes concentrações populacionais.	116
Figura 38: Adaptação da abordagem do padrão “Anéis de Densidade” (Padrão 29), considerando as elipses de distribuição direcional.	118
Figura 39: Exemplo ilustrativo da classificação das ordens de frequência de ligação entre cidades.	120
Figura 40: Densidades populacionais no Vale do Caí (RS).	121
Figura 41: Centros médios geométricos e ponderados pela densidade.	122
Figura 42: Densidades populacionais e distribuição direcional no Vale do rio Caí.....	123
Figura 43: Padrões de gradientes de densidade populacional.	124

Figura 44: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Alto Feliz, Linha Nova e São José do Hortêncio.	125
Figura 45: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Salvador do Sul e São Pedro da Serra.	126
Figura 46: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Harmonia, Pareci Novo e Tupandi.	127
Figura 47: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Barão, Maratá e São Vendelino.	128
Figura 48: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Bom Princípio, Vale Real, São Sebastião do Caí, Capela de Santana e Montenegro.	129
Figura 49: Gradientes de densidade, nos municípios de Brochier e São José do Sul.	131
Figura 50: Gradientes de densidades populacionais do município de Feliz.	132
Figura 51: Soluções para esgotamento sanitário, com base na densidade, para o município de Feliz/RS.	133
Figura 52: Ilustração do ajuste, de acordo com o padrão de Distribuição das Cidades.	134
Figura 53: Distribuição dos centros urbanos, no Vale da Felicidade.	135
Figura 54: Distâncias existentes, a partir dos centros urbanos, considerando a rede viária e a distância estimada pelo padrão de Alexander, no Vale da Felicidade.	136
Figura 55: Rede de influência dos municípios do Vale da Felicidade: a) índice de atração de municipalidades localizadas no Vale da Felicidade, com seus respectivos destinos b) ligações com origem e destino locais e c) ligações com origem local e destinos externos.	138
Figura 56: Distribuição das ligações com origem e destino internas ao Vale da Felicidade.	139
Figura 57: Índices componentes do IEX.	144
Figura 58: Normalização dos índices de inclusão e exclusão social.	145
Figura 59: Distribuição dos indicadores positivos e negativos componentes do: a) Índice de Autonomia de Renda (IAR);	150
Figura 60: Mapa do Índice de Autonomia de Renda.	152
Figura 61: Mapa do Índice de Qualidade de Vida.	153
Figura 62: Mapa do Índice de Qualidade de Vida.	154
Figura 63: Mapa do Índice de Equidade.	155
Figura 64: a) Mapa da Inclusão/Exclusão Social; b) <i>boxplot</i> do IEX; e c) histograma de distribuição dos IEX.	156

Figura 65: <i>Clusters</i> e <i>outliers</i> locais de Inclusão/Exclusão Social.....	157
Figura 66. Detalhamento dos <i>clusters</i> e <i>outliers</i> locais de Inclusão/Exclusão Social.....	158
Figura 67: Padrões de refletância, em diferentes comprimentos de onda, característicos de diferentes materiais.	161
Figura 68: Composição dos 12 períodos uniformizados.	164
Figura 69: Diagrama esquemático da obtenção do CDI.....	168
Figura 70: Padrões de <i>hot spots</i> emergentes.....	170
Figura 71: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI, no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21): a) mapeamento; b) distribuição dos valores do NDVI; e c) resumo estatístico.....	171
Figura 72: Indicador de Sequestro de Carbono pela Vegetação: a) mapeamento; b) distribuição do índice no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21); e c) resumo estatístico.	173
Figura 73: Índice de Área Construída por Diferença Normalizada: a) mapeamento; b) distribuição do índice no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21); e c) resumo estatístico.	174
Figura 74: Temperatura de Superfície: a) mapeamento; b) distribuição do índice no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21); e c) resumo estatístico.....	175
Figura 75: Histograma das mudanças entre os períodos inicial e final: a) no vigor vegetativo; b) no fluxo de CO ₂ ; c) na área construída; e d) nas temperaturas de superfície.....	177
Figura 76: Diferenças no NDBI e na temperatura superficial.	179
Figura 77: a) Índice de Detecção de Mudanças, entre as imagens representativas de 1987-88 e 2020-21; b) destaque para o município de Montenegro; c) destaque para o município de Capela de Santana; e d) percentual de área das diferentes classes de CDI, identificado por CDP de cada município.	181
Figura 78: Interpretação geral do CDI.....	182
Figura 79: Área percentual dos padrões emergentes de <i>hot spots</i> de temperatura superficial.....	184
Figura 80: Distribuição espacial dos padrões emergentes de <i>hot spots</i> da temperatura superficial.....	185
Figura 81: Distribuição, em termos percentuais, dos padrões emergentes de <i>hot spots</i> do NDBI.....	187
Figura 82: Distribuição espacial padrões emergentes de <i>hot spots</i> do NDBI	188

Figura 83: Proximidade à relação unitária, entre os eixos das elipses de distribuição direcional das densidades populacionais, dos municípios do Vale da Felicidade.	192
Figura 84: Métricas calculadas, nas diferentes escalas de análise.....	194
Figura 85: Procedimento de cálculo do Índice de Contiguidade.....	196
Figura 86: Assinatura espectral das classes de uso e cobertura do solo, nos municípios de Feliz, Maratá, Montenegro, Alto Feliz, Harmonia e Vale Real.....	198
Figura 87: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Feliz/RS.....	199
Figura 88: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Maratá/RS.....	200
Figura 89: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Montenegro/RS.	201
Figura 90: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Alto Feliz/RS.....	202
Figura 91: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Harmonia/RS.....	203
Figura 92: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Vale Real/RS.....	204
Figura 93: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Feliz.	209
Figura 94: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Maratá.	211
Figura 95: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Montenegro.....	213
Figura 96: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Alto Feliz.	215
Figura 97: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Harmonia.	217
Figura 98: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Vale Real.....	219
Figura 99: Relação entre as informações em escala regional e em escala local.....	222
Figura 100: Sumário estatístico de cada grupo.....	226
Figura 101: Gradientes de CO _{2flux} , NDVI, NDBI e temperatura superficial, nos CDPs dos municípios do Vale da Felicidade (RS).	228
Figura 102: Perfil das variáveis de CO _{2flux} , NDVI, NDBI e temperatura superficial, nos transectos Norte-Sul e Oeste-Leste, na área urbana central do município de Feliz.....	229
Figura 103: Temperaturas de superfície, por classe de uso e cobertura do solo.	231

Figura 104: Exemplos de áreas construídas que atingiram as temperaturas mínima, média e máxima.....	233
Figura 105: CO _{2flux} médio, por classe de uso e cobertura do solo.....	233
Figura 106: Perfil do potencial de sequestro de carbono no município de Feliz/RS.....	234
Figura 107: Relações entre a proporção de vegetação arbustiva, proporção de área urbana e altitude, com a temperatura superficial e o índice de sequestro de carbono.....	236
Figura 108: Resíduos padronizados vs. estimativa da temperatura superficial e do índice CO _{2flux} , com base na estimativa realizada por meio das regressões lineares.....	237
Figura 109. Representação das RNAs, para estimativa das temperaturas superficiais e CO _{2flux}	238
Figura 110: Resíduos padronizados vs. estimativa da temperatura superficial e do índice CO _{2flux} , com base na estimativa realizada por meio das RNAs.....	239
Figura 111. Comparação entre as estimativas da temperatura superficial e do índice CO _{2flux} , com base nas estimativas realizadas por meio de regressões lineares e de RNAs.	240
Figura 112: Estatística pseudo-F, considerando a composição do uso e ocupação do solo e: a) a temperatura de superfície; e b) o índice CO _{2flux}	241
Figura 113: Grupos da análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo, altitude e temperaturas de superfície.	244
Figura 114: Grupos da análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo e do índice CO _{2flux}	247
Figura 115: Temperaturas superficiais e CO _{2flux} . nos grupos da classe de vegetação arbustiva.....	251
Figura 116: Análise bivariada dos componentes dos índices de: ameaça climática, vulnerabilidade e exposição.....	256
Figura 117: Fluxo ilustrativo do procedimento adotado para estimar o Indicador de População Atendida.	257
Figura 118: Condição do produtor, em relação à propriedade da terra.	259
Figura 119: Número de agricultores nos municípios constituintes do Vale da Felicidade e área média de produção, na agricultura familiar e não-familiar.	261
Figura 120: Produtividades, expressas em toneladas por hectare, associadas às espécies hortícolas cultivadas no Vale da Felicidade.	263
Figura 121: Produtividade normalizada, associando a área de cada cultivo às suas respectivas produtividades.	264

Figura 122: Destinos da produção hortícola, com origem em três municípios localizados no Vale da Felicidade.	265
Figura 123: Despesa média mensal familiar associada à alimentação.	267
Figura 124: Índice de Risco de Impactos para a Segurança Alimentar, nos municípios do Vale da Felicidade (RS).	268
Figura 125: Índices do Risco de Impacto frente à Seca e seus componentes.	270
Figura 126: Distâncias entre os produtores e o CDP: resumo estatístico das distâncias de deslocamento; boxplot das distâncias; e histograma de distribuição das distâncias de deslocamento.	271
Figura 127: Conectividade entre os estabelecimentos agropecuários e os CDPs mais próximos.	273
Figura 128: Distribuição de densidades de estabelecimentos agropecuários.	274
Figura 129: Indicador de População Atendida nas áreas com potencial para a implantação de hortas urbanas.	278
Figura 130: Indicador de Inclusão/Exclusão Social (IEX), em áreas com potencial para a implantação de hortas urbanas.	280
Figura 131: Indicador de Continuidade em áreas passíveis de implantação de hortas urbanas.	282
Figura 132: Indicador de Temperatura de Superfície, em áreas passíveis de implantação de hortas urbanas.	284
Figura 133: Caracterização por grupos, segundo valores médios das variáveis, dos municípios de Alto Feliz, Montenegro e Harmonia.	285
Figura 134: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Alto Feliz.	287
Figura 135: Análise por grupos de: população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Montenegro/RS.	289
Figura 136: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Harmonia.	291
Figura 137: Caracterização por grupos, segundo valores médios das variáveis, no município de Maratá.	292
Figura 138: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Maratá.	293

Figura 139: Caracterização por grupos, segundo valores médios das variáveis, nos municípios de Vale Real e Feliz	295
Figura 140: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Vale Real.	296
Figura 141: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Feliz.	298
Figura 142: Amostras de áreas correspondentes ao Grupo 1, no município de Feliz.	300
Figura 143: Amostras de áreas correspondentes ao Grupo 2, no município de Feliz.	300
Figura 144: Amostras de áreas correspondentes ao Grupo 3, no município de Feliz.	301
Figura 145: Vazios urbanos, constituindo-se em áreas potencialmente aptas para a implantação de hortas urbanas, no município de Feliz.	303
Figura 146: Áreas disponíveis, em zonas alagáveis, para implantação de hortas urbanas no município de Feliz.	304
Figura 147: Áreas disponíveis, em vazios urbanos e alagáveis, para implantação de hortas urbanas, no município de Feliz.	305

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Datas das imagens utilizadas	164
Tabela 2 – Constantes de calibração da banda do termal dos satélites Landsat 5 e Landsat 8.	166
Tabela 3 – Proporção da área total associada aos padrões emergentes de hot spot das temperaturas superficiais, nas elipses de densidade populacionais dos municípios do Vale da Felicidade	186
Tabela 4 – Proporção da área total caracterizada por padrões emergentes de <i>hot spot</i> do NDBI, nas elipses de densidade populacionais dos municípios do Vale da Felicidade. ...	189
Tabela 5 – Área das classes de uso e cobertura do solo.	205
Tabela 6 – Métricas de paisagem, em nível da paisagem.....	205
Tabela 7 – Métricas de paisagem, em nível das classes de uso e cobertura do solo.	207
Tabela 8 – Arquitetura das Redes Neurais Artificiais.	224
Tabela 9 – Resultados das redes obtidas pelo algoritmo <i>Levenberg-Marquardt</i>	239
Tabela 10 – Análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo, altitude e temperaturas de superfície.	243
Tabela 11 – Análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo e do índice CO ₂ flux.	246
Tabela 12 – Análise multivariada das métricas das áreas de vegetação arbustiva.	249
Tabela 13 – Área demandada para o cultivo de alimentos com origem na horticultura, para atender à necessidade das populações dos municípios sendo referidos.....	276
Tabela 14 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Alto Feliz.....	288
Tabela 15 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Montenegro.	290
Tabela 16 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Harmonia.	292
Tabela 17 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Maratá.....	294
Tabela 18 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Vale Real.	297
Tabela 19 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Feliz.	299

LISTA DE SIGLAS

CBERS: *China-Brazil Earth Resources Satellite*, Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

CDI: *Change Detection Index*, Índice de Detecção de Mudança

CDP: Centro de Densidade Populacional

CO_{2flux}: Indicador de Sequestro de Carbono da Atmosfera

IEX: Índice de Inclusão/Exclusão Social

IAR: Índice de Autonomia de Renda

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IQV: Índice de Qualidade de Vida

IEQ: Índice de Equidade

IDH: Índice de Desenvolvimento Humano

NDBI: *normalized difference built-up index*, índice de área construída por diferença normalizada

NDVI: *normalized difference vegetation index*, índice de vegetação por diferença normalizada

PRI: Padrão de Referência de Inclusão

1 INTRODUÇÃO

A ação antrópica modifica a dinâmica dos ecossistemas e promove alterações nas propriedades da superfície do planeta, uma vez que está associada a processos essencialmente dependentes do uso de combustíveis fósseis e a intervenções impactantes sobre a cobertura, e no uso, da terra. Esses impactos estão, em parte, associados ao crescimento e à correspondente necessidade de atendimento às demandas humanas.

Além de principal agente de mudanças climáticas, o ambiente urbano é, também, um dos principais impactados pela intensificação dos eventos extremos. De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016), as mudanças climáticas crescentemente acentuam os problemas urbanos atuais. Além disso, o crescimento das cidades, sem orientação à sustentabilidade, as expõe a efeitos cascata, que se somam nos diferentes sistemas urbanos, interdependentes entre si, como os setores de água, saneamento, energia e transporte.

Nos países em desenvolvimento, o atendimento às necessidades humanas e, também, as políticas desenvolvidas no contexto urbano, vêm se baseando em mecanismos e processos socialmente excludentes e ambientalmente degradantes, com impactos que extrapolam os limites administrativos das áreas para as quais foram destinadas, assim como limitam sua capacidade de responder a mudanças eventualmente ocorrentes. O enfrentamento do quadro atual requer capacitar as comunidades para ações efetivas de governança, que permitam desenhar e executar as políticas de forma integrada. Para tal, faz-se necessário o reconhecimento dos equívocos do passado e da responsabilidade pelo futuro; caso contrário, será improvável a reversão da presente situação, bem como serão desperdiçadas as oportunidades disponíveis para o enfrentamento da crise climática (PBMC, 2014; PBMC, 2016).

Diante de novos desafios ambientais, são necessárias soluções cada vez mais integradas, convergindo para uma necessidade de desenvolvimento de um saber transdisciplinar. Diferentemente da visão reducionista, em que o conhecimento é desenvolvido de forma fragmentada, a visão holística das problemáticas ambientais é fundamental, não apenas na compreensão de sua natureza em si, mas na proposição de ações que venham a ser mais efetivas.

Em seu tratamento, as questões ambientais podem ser avaliadas sob o enfoque de seus sistemas natural, construído e humano. Essa abordagem possui vantagens práticas, em termos de desenvolvimento de planos setoriais, e facilita a identificação dos principais responsáveis pela condução desses planos. É necessário, entretanto, que sejam reconhecidas as relações e correlações existentes entre tais sistemas. Nesse contexto, Porto e Menegat (2004) apresentam o conceito de Ecossistema Humano Total, como um resultado integral de todas as interações. Essa ideia alude à visão da natureza como um todo estruturado, organizado em uma hierarquia e estratificado em diversos níveis.

A consideração holística das questões relacionadas ao meio ambiente vem permeando as discussões científicas, tendo estas sido intensificadas a partir do século XX. Um dos marcos dessa mudança de paradigma, que traz as fundamentações para a análise sistêmica das questões ambientais, foi a formulação da Hipótese de Gaia: segundo a teoria de Lovelock (2000), o planeta pode ser considerado como um sistema autorregulado, dinâmico e integrado, constituído de subsistemas capazes de regular as condições necessárias à vida.

Além de sua contribuição pioneira destacando a importância da medição do acúmulo de gases poluentes na atmosfera, o autor propõe uma alternativa para avaliação das questões ambientais, que contrasta com aquela da visão antropocêntrica:

As ideias que se originam da teoria de Gaia nos colocam em nosso devido lugar, como parte do sistema da Terra – não somos proprietários, gerentes, comissários ou pessoas encarregadas [...]. Tal maneira de pensar deixa claro que não temos direitos especiais; somos apenas uma das espécies no grande empreendimento de Gaia (LOVELOCK, 2020).

No contexto nacional, Lutzenberger (1976), um dos principais divulgadores da visão holística proposta pela Teoria de Gaia, apresenta práticas e teorias inspiradas no funcionamento dos sistemas naturais, que foram concretizadas na concepção do Rincão Gaia¹. Este conceito orienta um de seus princípios: “A Natureza não é um aglomerado arbitrário de fatos isolados, arbitrariamente alteráveis ou dispensáveis. Tudo está relacionado com tudo”.

Questões anteriormente tidas como particulares, são vistas, na ótica atual, como planetárias. Por exemplo: soluções para o fornecimento de energia; controle da poluição; e disseminação de

¹ A Fundação Rincão Gaia, cujas atividades são fundamentadas teórica e ideologicamente na Teoria de Gaia, é um exemplo prático e economicamente viável de como áreas degradadas podem ser recuperadas. Situada no interior do Rio Grande do Sul, no município de Rio Pardo, o local é um centro de educação ambiental e divulgação da agricultura regenerativa, orgânica e sustentável. Ver: <http://www.fgaia.org.br/rincao.html>

doenças. Dessa forma, surge a necessidade de uma nova epistemologia, que considere a integração disciplinar.

Neste contexto, a visão sistêmica nos abre o caminho para compreender melhor os problemas humanos, alinhando-se à visão holística, e adicionando à discussão três componentes fundamentais e indissolúveis: os elementos do sistema; as interconexões entre eles; e sua função ou propósito. Conforme apresentam Meadows e Wright (2008), um sistema é mais do que o soma de suas partes e apresenta um comportamento adaptativo, dinâmico, auto preservativo. A visão sistêmica torna possível aprimorar a compreensão sobre a totalidade dos sistemas, tornando possível o entendimento mais profundo sobre seus elementos e a identificação de suas interconexões.

Existe um consenso sobre a complexidade dos sistemas físicos, biológicos, sociais e econômicos. Nos estudos que envolvem as análises ecológica e ambiental, a abordagem holística sistêmica é fundamental na compreensão da organização das entidades ambientais, expressas em organizações espaciais, e da maneira como se estruturam e funcionam, como unidades complexas em si mesmas. É importante reconhecer que seus subconjuntos também são sistemas complexos, a exemplo dos sistemas socioeconômicos, ecossistemas, sistemas hidrológicos e dos sistemas urbanos (CHRISTOFOLETTI, 2001).

As cidades, caracterizadas como sistemas complexos, são cenários que também abrigam e promovem interações nos mais diversos níveis. É nesse sentido que os estudos urbanos não podem ser considerados de forma isolada. Newman e Jennings (2008) destacam a necessidade de encarar as cidades como ecossistemas integrados, em seu contexto mais amplo.

É nesse contexto que a compreensão mais ampla da resiliência urbana se torna fundamental para a condução de um processo de crescimento mais sustentável, e, por consequência, viabiliza relações mais saudáveis entre os sistemas natural, construído e cultural ou humano. A abordagem sistêmica pode ser adequada para esse entendimento, não como uma metodologia em si, mas como um modelo epistemológico.

O pensamento complexo tem sido revisitado nas disciplinas do planejamento urbano. A complexidade nos estudos urbanos é identificada, justamente, na característica sobreposta, interconectada e hierárquica de seus subsistemas, nos quais é identificada a capacidade de auto-organização, adaptação e coevolução (BASU et al., 2019; BATTY, 2013; BATTY e MARSHALL, 2012).

O estudo dos sistemas urbanos, dada sua complexidade, evidencia algumas limitações práticas: como lidar com a multiplicidade de componentes, processos e interações, que ocorrem dentro e além dos limites físicos, lógicos (isto é, legais) e virtuais (ciberespaço) da cidade? Planejar a resiliência diante dos estressores urbanos requer, não só o conhecimento das componentes vulneráveis, mas também a compreensão dos principais processos e interações que organizam esses componentes (DESOUZA; FLANERY, 2013).

1.1 ELABORANDO O PROBLEMA

A compreensão das relações entre as ações humanas e o meio ambiente requer uma visão articulada de seus vários componentes, uma vez que envolve efeitos que estão, em última instância, conectados, e que extrapolam os limites administrativos. O desconhecimento dos processos urbanos pode contribuir para a reprodução dos padrões geralmente observados nas grandes cidades, muitas vezes insustentáveis. É fundamental que a ação antrópica seja reconhecida como principal contribuinte para o surgimento dos problemas ambientais; mesmo assim, o emprego dos recursos tecnológicos existentes poderá ser de máxima valia e decisivo no enfrentamento aos novos desafios climáticos.

Os modelos determinísticos para análise do ambiente urbano, em geral baseados em uma visão mecanicista, podem auxiliar no entendimento de subsistemas específicos. Tais modelos são capazes de caracterizar, de forma suficientemente precisa, os elementos que constituem um sistema urbano. Porém, os resultados dessas análises apresentam limitações, seja no entendimento do sistema em si, seja ao considerar suas diversas interconexões, funções e seu caráter essencialmente dinâmico.

Considerar a complexidade de um sistema urbano sob a ótica de uma visão sistêmica, pode levar a conclusões mais alinhadas à natureza de tais aspectos. De acordo com Meadows e Wright (2008), os estudos de sistemas dinâmicos geralmente não objetivam prever o que irá acontecer: eles são projetados para explorar o que aconteceria, se um conjunto de fatores ocorresse de várias maneiras diferentes. Essa abordagem permite explorar comportamentos futuros e propor soluções criativas para o redesenho do sistema.

Diante desse cenário, surge a necessidade de reavaliar as tradicionais ferramentas utilizadas para o estudo do ambiente urbano. De forma prática, a consideração da complexidade que

identifica os sistemas urbanos requer, além de uma compreensão holística, o desenvolvimento de novas estratégias, que considerem as relações entre os seus diversos subsistemas, no tempo e no espaço. Este processo requer a consideração de um grande número de informações, que devem ser tratadas e administradas no planejamento urbano e na gestão dos recursos naturais e econômicos, possibilitando a identificação das vulnerabilidades locais.

As técnicas disponíveis para a abordagem dos sistemas urbanos, enquanto sistemas complexos, entretanto, requerem um instrumental apropriado. Em especial, deve ser destacado que a realidade na qual os países em desenvolvimento estão inseridos é caracterizada pela ausência de levantamentos e informações, em quantidade e qualidade adequadas, para um aprofundamento da análise de seus processos. Mesmo nas grandes cidades e regiões metropolitanas os dados disponíveis são, comumente, escassos, fragmentados ou mesmo inexistentes.

Entretanto, o estudo das cidades não pode ser um privilégio das populações com maiores recursos. Em particular, uma avaliação mais criteriosa quanto aos processos existentes nas pequenas e médias municipalidades brasileiras, com urbanização ainda em fase inicial, é fundamental para que seja possível construir uma visão mais positiva de futuro.

A avaliação exclusiva de cidades maiores limita o desenvolvimento mais amplo de estudos urbanos: este viés restringe a compreensão do quadro completo, uma vez que o mundo urbano é constituído, também, pelas pequenas e médias municipalidades (BELL; JAYNE, 2009).

De acordo com o IGBE (BRASIL, 2021), cerca de 94% dos municípios brasileiros possuíam, em 2021, menos de 100.000 habitantes, abrigando 42% dos brasileiros. Os pequenos e médios municípios, entretanto, carecem de uma política específica, para orientar seu desenvolvimento, e de estudos, que avaliem a influência da forma como o ambiente urbano é construído, relativamente a questões ambientais e socioespaciais. De acordo com o Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001), a obrigatoriedade de desenvolvimento de Plano Diretor é aplicada apenas aos municípios com população superior a 20.000 habitantes.

As cidades de menor porte enfrentam desafios semelhantes aos das cidades maiores, embora em diferentes escalas, pois, em ambos os casos, a transformação de seus territórios resulta em efeitos no microclima local e afeta a qualidade ambiental e de vida das comunidades. Entretanto, tais localidades menores, em geral, estão menos equipadas para responder efetivamente a esses desafios, devido à sua menor disponibilidade de recursos e de capital

humano, assim como uma menor conectividade e acesso a dados de monitoramento, aumentando sua vulnerabilidade.

A construção de um referencial para a construção da resiliência, também nas pequenas e médias cidades, é fundamental no enfrentamento da crise climática. Desta forma, é necessário equipar a todos os planejadores urbanos com ferramentas e metodologias, que permitam uma avaliação mais assertiva do cenário urbano, ao mesmo tempo em que contornem as limitações resultantes da ausência de levantamentos específicos, valendo-se do potencial pouco explorado de informações já existentes.

Nesta direção, faz-se necessário esclarecer: de que forma o emprego de ferramentas disponíveis, pode auxiliar na compreensão da complexidade dos sistemas urbanos dessas municipalidades; e como a utilização de dados publicamente disponíveis, poderá contribuir para o desenvolvimento de análises, que auxiliem na tomada de decisões e na elaboração de políticas públicas, de modo a bem atender às necessidades específicas de cidades com características distintas às das grandes metrópoles.

1.2 QUESTÕES DA PESQUISA

Diante da problemática apresentada no item anterior, foi formulada a principal questão que orienta esta pesquisa:

Como novas tecnologias de baixo custo podem contribuir para uma análise objetiva dos sistemas urbanos complexos, no contexto de municípios de pequeno porte?

As questões secundárias, decorrentes do desdobramento da questão principal, são destacadas a seguir:

- a) Que ferramentas de geonálise, associadas a técnicas de inteligência artificial, podem auxiliar, de forma prática, no entendimento da complexidade dos sistemas urbanos?
- b) Quais os dados espaciais, já disponíveis no contexto nacional, poderão ser explorados para a compreensão das interconexões dos subsistemas urbanos?
- c) Como é possível contornar as limitações para a incorporação dessas técnicas na rotina do planejamento urbano das pequenas municipalidades brasileiras?

- d) Como identificar diretrizes de sustentabilidade, a partir de uma avaliação sistêmica?

A construção dessas respostas conduz ao reconhecimento das lições do passado, à consideração das tecnologias do presente, e a uma visão de transição para um futuro mais resiliente e possível.

1.3 HIPÓTESES DE TRABALHO

A presente investigação parte da hipótese de que a avaliação do ambiente construído em pequenas municipalidades, à luz do entendimento da complexidade dos sistemas urbanos, pode conduzir a uma compreensão mais ampla e assertiva da sustentabilidade de seus processos, mesmo que suportada por ferramentas de baixo custo.

Para demonstração desta hipótese, o teste de hipóteses preliminares é necessário, sendo elas:

- a) Os subsistemas urbanos atuam de forma sinérgica, e podem ser avaliados a partir de técnicas de análise de dados já disponíveis e de acesso público;
- b) As diferentes escalas de análise de áreas estratégicas do ambiente urbano, conduzem a soluções interdependentes;
- c) Ferramentas de geoanálise, associadas a técnicas de inteligência artificial, podem auxiliar na compreensão de padrões complexos, ampliando o conhecimento sobre a dinâmica urbana das pequenas municipalidades e facilitando o diagnóstico dos pontos críticos, em apoio às tomadas de decisão.

1.4 PROPÓSITOS DA INVESTIGAÇÃO

O objetivo geral do presente trabalho é o de propor uma estrutura-piloto para a avaliação de subsistemas urbanos em pequenas e médias municipalidades brasileiras, com base em ferramentas de geoanálise e de aprendizado de máquinas, bem como em uma abordagem sistêmica, como elemento integrador. Busca-se, dessa forma, a elaboração de uma referência, que contribua para a análise de subsistemas urbanos, baseada em dados gratuitos e públicos,

temporais e espaciais, e que possa ser replicada em pequenas e médias municipalidades brasileiras.

Para atingir o objetivo supracitado, propõe-se o atendimento aos seguintes objetivos específicos, que serão aplicadas à região do Vale do Caí (RS):

- a) Identificar subsistemas relevantes, em termos de sustentabilidade urbana, passíveis de serem estudados sob a perspectiva da ciência dos dados, com base em dados espaciais públicos e disponíveis para todo o território nacional;
- b) Avaliar a ocupação do território, em termos de densidades populacionais, pela rede das cidades que compõem a área de estudo;
- c) Caracterizar a ocupação socioespacial, identificando padrões espaciais de inclusão e exclusão social, por meio de técnicas de geoanálise;
- d) Analisar espacial e temporalmente a paisagem regional, em termos de: índice de vegetação; índice de área construída; capacidade de sequestro de carbono pela vegetação; e evolução do campo térmico;
- e) Analisar a paisagem intraurbana, em termos de: uso e ocupação do solo; e métricas da paisagem;
- f) Realizar uma análise exploratória multiescalar, verificando a influência da composição do uso e ocupação do solo, aí incluídas as métricas das áreas verdes, nas variáveis de temperatura superficial e do índice de sequestro de carbono, com base em: modelos lineares de previsão; e técnicas de geoanálise e aprendizado de máquinas;
- g) Qualificar e quantificar as relações entre os subsistemas urbanos trabalhados, em uma aplicação voltada ao aproveitamento de áreas para a produção urbana de alimentos, com base em técnicas de geoanálise e aprendizado de máquinas;
- h) Desenvolver um aplicativo baseado em nuvem, para consulta e acesso a todas as camadas de informação georreferenciada produzidas;
- i) Identificar, por meio de avaliações objetivas, fatores que podem contribuir para a sustentabilidade urbana de pequenas municipalidades.

1.5 ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

Em contraponto a uma tendência nacional, um grupo de municípios da região situada no Vale do Rio Caí, no Estado do Rio Grande do Sul, vêm recebendo destaque pelo seu bom desempenho nos diversos índices relacionados à qualidade de vida. Segundo a FGV (2012), a renda é apenas uma das características contribuintes para a qualidade de vida, que deve considerar, dentre outras variáveis: as condições habitacionais; o acesso e a qualidade da educação básica e do atendimento à saúde; a segurança pública; e as características do mercado de trabalho; como igualmente determinantes da qualidade de vida local.

Após a publicação de Todeschini (2007) revelar uma parte do Brasil, cujos índices destoavam da média nacional, o título de “Vale da Felicidade” passou a designar esta região de colonização alemã. Além do alto padrão de escolarização da população, como contribuinte para o seu desenvolvimento, outro fator relevante é a presença de uma economia destacadamente local e independente. Devido ao conjunto de índices positivos aí encontrados, semelhantes aos de países desenvolvidos, o autor se referiu à região como um “Brasil europeu”. Destaca-se, contudo, que essa designação não deve limitar sua colocação, enquanto um lugar feito por brasileiros e possível para brasileiros.

Desta forma, entende-se que a região Vale do Caí (RS) possa constituir, não apenas um local de estudo para discussão e teste das hipóteses supracitadas, mas, também, uma referência de comunidade qualificada, em termos de sustentabilidade. É nesse sentido que é enveredada uma análise exploratória da região, em um diagnóstico que permita uma ampla compreensão, e que conduza a uma discussão sobre os fatores que podem contribuir para a sustentabilidade urbana das pequenas municipalidades, no contexto nacional.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo, será realizado o delineamento da pesquisa e apresentada sua estrutura. A investigação proposta tem um caráter de **pesquisa exploratória**, uma vez que tem, alinhada a seus objetivos, a perspectiva de “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses” (GIL, 2017).

Conforme exposto por Gil (2017), neste tipo de avaliação pretende-se aprimorar ideias e aprofundar o entendimento de novas concepções, considerando diversos aspectos relacionados ao fato estudado. Na presente pesquisa, as discussões serão conduzidas e ilustradas por aplicações práticas, que facilitem a compreensão das ideias propostas, voltadas ao estudo de caso da região do Vale do Rio Caí – ou, como aqui denominaremos, do Vale da Felicidade.

2.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Para o delineamento da pesquisa, foi admitida a adequação da região de estudo, como referência de comunidade qualificada – conforme discutido na seção 1.5 –, e, também, a existência de dados públicos, gratuitos e disponíveis para alimentar a avaliação da região. A abordagem propõe uma avaliação multiescalar, estruturada nas etapas descritas a seguir.

Etapa I: Arcabouço Teórico

O pensamento sistêmico é discutido, enquanto um modelo adequado à visão holística inerente aos problemas urbanos. Os conceitos do pensamento sistêmico informam que interfaces e hierarquias são fundamentais para entender a estrutura ecossistêmica do Vale da Felicidade. Nesse contexto, são apresentadas algumas das ferramentas e métodos disponíveis, que possam contribuir, de forma prática, para a inclusão da complexidade urbana, à tomada de decisão. Aprofunda-se a discussão sobre a visão holística, associada às novas tecnologias de baixo custo e a dados preexistentes, que possam contribuir para análises dos sistemas urbanos. As metodologias para avaliação desses sistemas, com o uso de técnicas de geoanálise e aprendizado de máquinas, são avaliadas por meio de uma revisão sistemática, tomando, como pano de fundo, a questão da resiliência urbana.

Etapa II: Área de Estudo

Nessa etapa é apresentada a área de estudo. É importante destacar que, embora a área de estudo seja referida como inserida em escala regional, ao longo do trabalho são desenvolvidos estudos que contemplam, também, as escalas de centro demográfico e intraurbana. Busca-se, desta forma, avaliar, também, a influência dos padrões espaciais e temporais, de cada uma das unidades de análise, e suas relações, que são detalhadas em capítulos específicos. A Figura 1 ilustra as unidades de paisagem em análise:

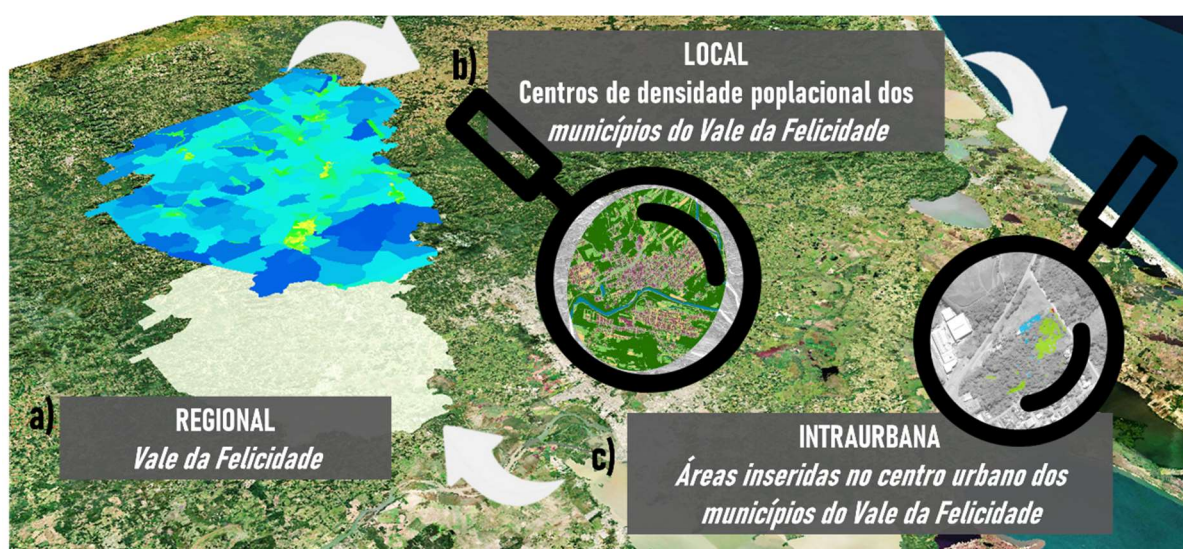


Figura 1: Representação das unidades de análise da paisagem: a) regional; b) local e; c) intraurbana.
(Elaborada pela autora, 2022)

Etapa III: Estrutura-piloto para avaliação holística de pequenas municipalidades

Nessa etapa é proposta uma estrutura-piloto, que poderá ser utilizada na avaliação de subsistemas urbanos, em pequenas municipalidades brasileiras. A avaliação com base em dados existentes deve ser entendida como um *proxy*: são dados que podem ser comutados em outro, sendo este legível aos conceitos da visão sistêmica. Por meio da estrutura-piloto proposta, é possível explorar dados existentes de forma mais eficaz, gerando informações e conduzindo a um maior conhecimento dos processos ocorridos nesses municípios. Em um processo cíclico, os resultados obtidos poderão alimentar outras análises e gerar novas informações, a partir das quais o conhecimento possa ser aprofundado e a visão holística ampliada.

Ainda que a ideia que fundamenta a presente pesquisa se baseie no fato de que os subconjuntos avaliados estejam interconectados, a apresentação dos resultados será subdividida em quatro temáticas, descritas a seguir. Com esta subdivisão, pretende-se estruturar a apresentação do trabalho de forma mais clara, estabelecendo relações entre as temáticas que permearão as discussões, em todas as seções.

- **Ocupação do território:** são avaliados os padrões e interfaces associados à **Densidade Populacional**, com base em dados do Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por meio de análise geostatística e estatística espacial, à luz de teorias clássicas sobre sustentabilidade. Adicionalmente, é realizada a análise da **Rede de Cidades**, que integram a área de estudo, incluindo sua conectividade, com base, também, em dados da plataforma colaborativa *Open Street Maps*.
- **Dimensão Social:** a discussão é desenvolvida com base no mapeamento dos indicadores de inclusão e exclusão social. Esses resultados podem ser entendidos como *proxy* de: dependência/independência econômica; sistema econômico endógeno; interfaces; e trocas. Os dados-base para a avaliação e espacialização dos indicadores de renda e acesso a serviços de saneamento básico e habitação foram obtidos a partir dos dados censitários do ano de 2010, na resolução dos setores censitários.
- **Dimensão Ambiental:** a avaliação das alterações no índice de vegetação, índice de área construída, capacidade de sequestro de carbono da atmosfera e do campo térmico dos municípios, decorrentes dos processos de urbanização, são entendidos como um *proxy* da eficiência ambiental da paisagem, na escala regional. Na escala intraurbana, são, assim, considerados: o uso e ocupação do solo e as métricas da paisagem.
- **Sistema Alimentar Urbano:** o sistema alimentar pode ser entendido como um *proxy* de: dependência/independência econômica; redes de conexão social; economia endógena; e geração de interfaces sociais e ambientais. É realizada uma caracterização da produção hortícola da região, associada a uma avaliação do potencial para a implantação de áreas de produção urbana de alimentos, com base em uma análise socioespacial, que incluiu: a análise da paisagem; as condições de inclusão social; a densidade populacional; e o potencial de controle da temperatura de superfície, conferido por esses espaços. Além da geonálise, serão empregadas técnicas de aprendizado de máquinas, para a realização de uma análise multivariada, que considere,

de forma sinérgica, as variáveis envolvidas e possibilite a identificação de padrões complexos.

Etapa IV: SIG Vale da Felicidade

Nessa etapa é desenvolvido um aplicativo, que permite a navegação e o acesso a todas as camadas de informação elaboradas.

As Etapas III e IV estão ilustradas na Figura 2.

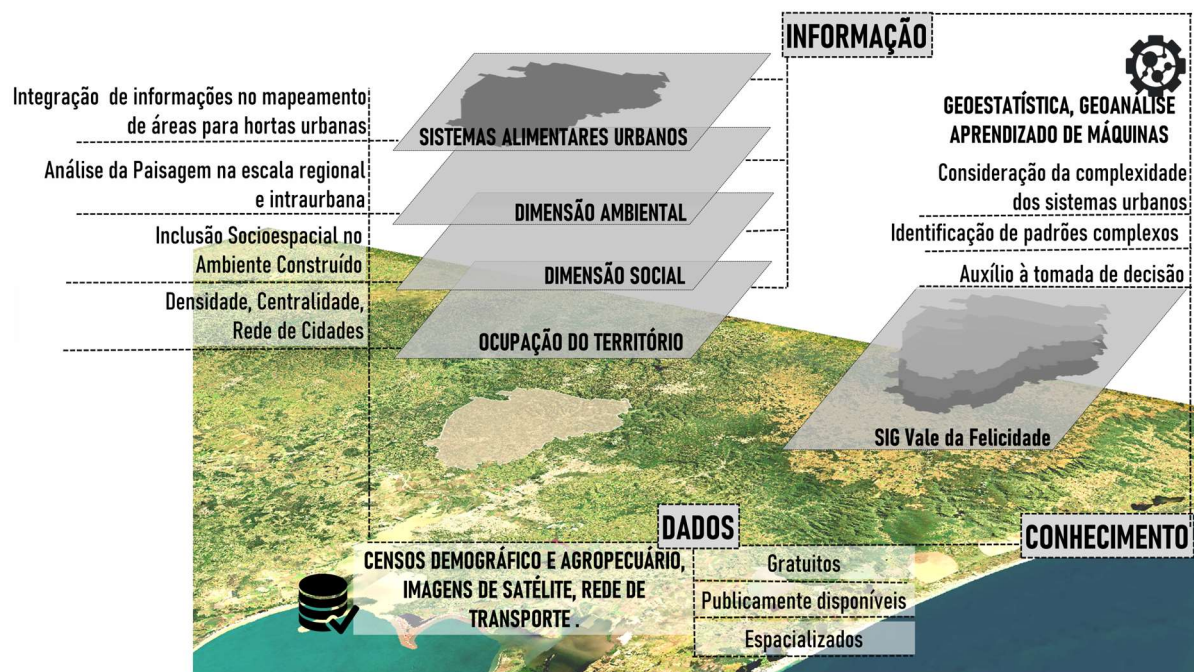


Figura 2: Estrutura-piloto para a avaliação de subsistemas urbanos, em pequenas municipalidades brasileiras.
(Elaborada pela autora, 2022)

Etapa V: Conclusões

As conclusões da pesquisa serão desenvolvidas no sentido de indicar como é possível, com base nos resultados obtidos, apoiar a identificação de padrões complexos que qualifiquem e quantifiquem questões importantes da sustentabilidade urbana.

2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O fluxo metodológico, proposto para o desenvolvimento das etapas acima descritas, está resumido e ilustrado na Figura 3.

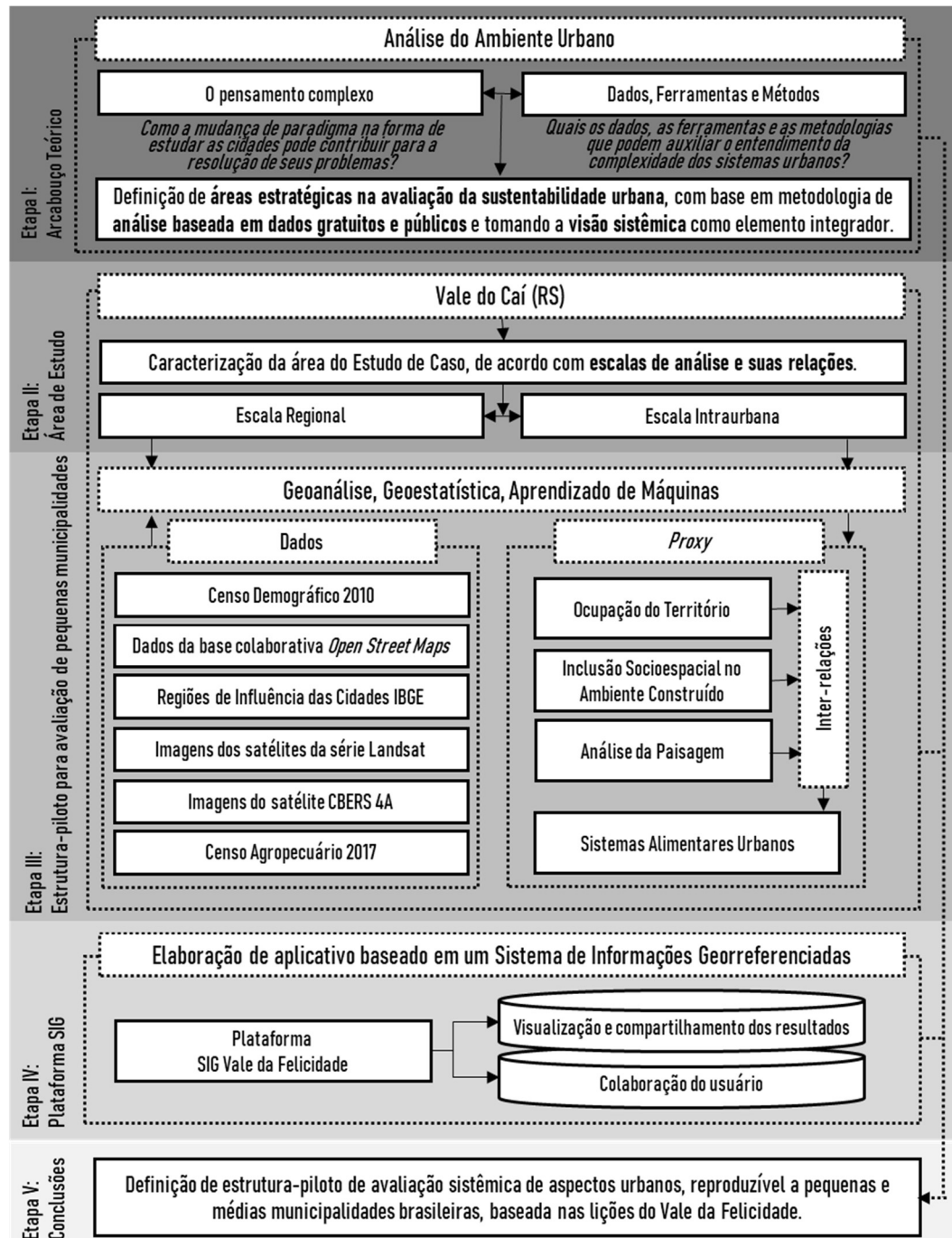


Figura 3: Delineamento da pesquisa.
(Elaborada pela autora, 2022)

Nesta seção, serão apresentados, resumidamente, os fluxos metodológicos utilizados no desenvolvimento das análises exploratórias propostas na Etapa III, e identificadas as escalas de investigação adotadas. Destaca-se que as informações sobre a coleta e tratamento dos dados, bem como a descrição dos procedimentos e técnicas adotados para cada avaliação, serão detalhadas em capítulos específicos.

A primeira parte da análise, da **ocupação do território**, voltada ao entendimento de questões relacionadas à **densidade e sustentabilidade**, foi desenvolvida na escala regional. Os dados do Censo Demográfico do IBGE (IBGE, 2010) foram espacializados, possibilitando o mapeamento das densidades populacionais, na resolução do setor censitário. À luz do padrão de Anéis de Densidade (Padrão 29), de Christopher Alexander² (ALEXANDER et al., 1977) e com o uso de ferramentas de análise espacial, foram obtidos os Centros de Densidades Populacionais (CDP), dos municípios constituintes do Vale da Felicidade. Tal recorte, identifica o ponto mais representativo do núcleo urbano de cada município, em termos de densidade populacional, quantificada e espacializada a partir dos setores censitários, considerando-se a população residente e a área do setor censitário.

Na segunda parte da análise, foi investigada a **rede de cidades**, utilizando-se, como referências para a avaliação das conexões e das distâncias entre as cidades: o padrão de Distribuição das Cidades (Padrão 2) (ALEXANDER et al., 1977); o estudo *Regiões de Influência das Cidades* (IBGE, 2018); os CDPs; e a rede viária dos municípios. O fluxo ilustrativo da metodologia utilizada é apresentado na Figura 4, e o seu detalhamento pode ser observado na seção 5.1.1 (p. 117).

² Em sua obra *Uma Linguagem de Padrões*, o arquiteto Christopher Alexander propõe 253 padrões, direcionados a solucionar diversos desafios de projeto. Tais padrões podem ser considerados uma compilação de diversos métodos científicos aceitos e, devido à riqueza de conexões, sua aplicação prática acarreta em soluções criativas e aplicáveis em diferentes contextos.

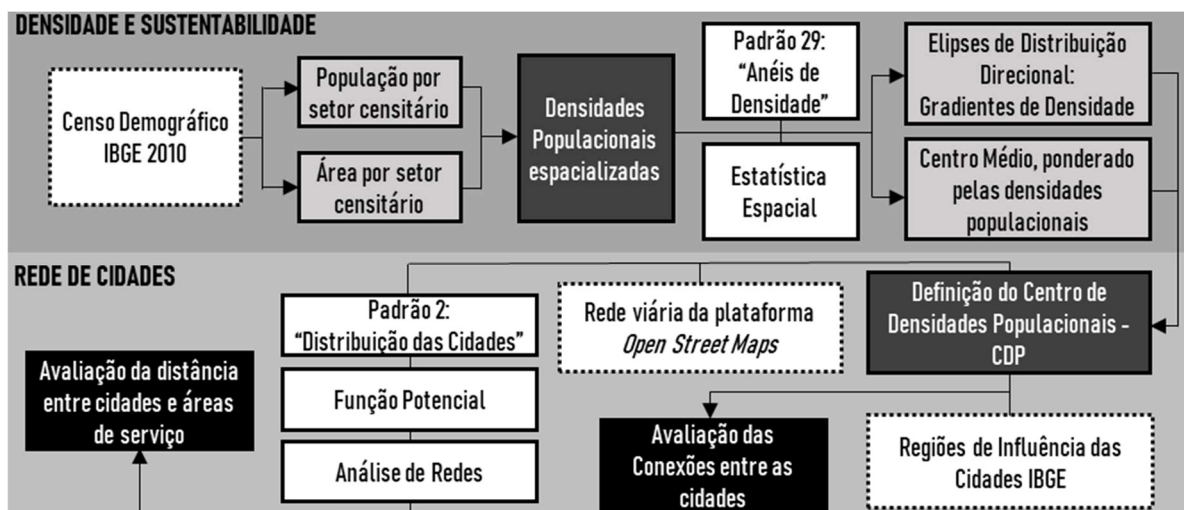


Figura 4: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para avaliação da ocupação do território.
(Elaborada pela autora, 2022)

A avaliação da **inclusão social no ambiente construído** foi realizada nos CDPs dos municípios, identificados na etapa anterior. Os índices representativos da inclusão ou exclusão social foram adaptados dos trabalhos de Sposati (1996) e Genovez (2002), considerando, como dados básicos para seu cálculo, aqueles disponibilizados pelo Censo Demográfico do IBGE (IBGE, 2010). A análise inclui, desta forma, todos os municípios da região, mas a escala de discussão é local, ao considerar os CDPs como recorte, e ocorre na resolução do setor censitário. Além da avaliação dos índices relacionados à inclusão e exclusão social, foi desenvolvida uma análise de padrões espaciais locais, por meio do cálculo do Índice Local de Moran (ANSELIN, 1995; CÂMARA; CORREA, 2004). Na Figura 5, observa-se o fluxo ilustrativo da metodologia. O detalhamento das considerações, das equações e dos procedimentos realizados, é apresentado na seção 5.2.2 (p. 143).

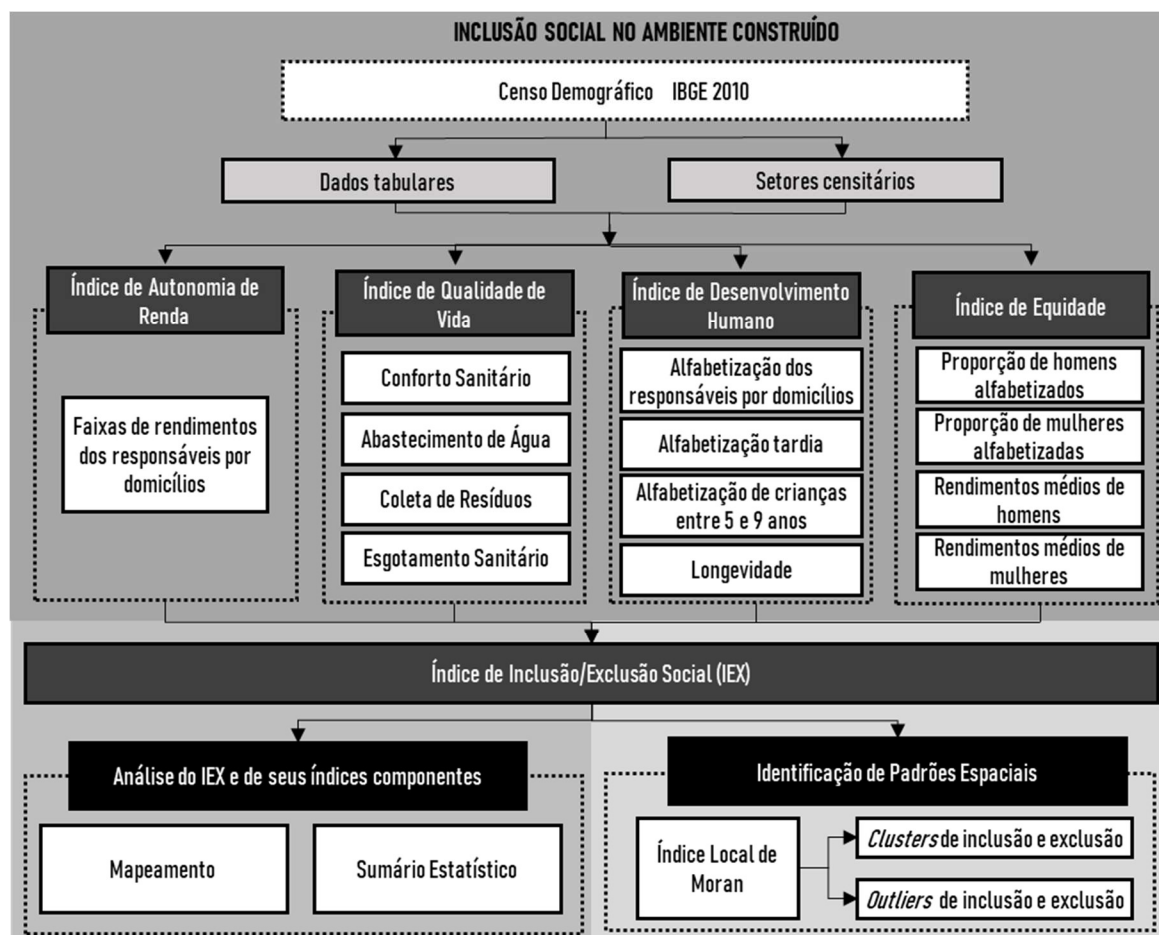


Figura 5: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para avaliação da inclusão social no ambiente construído.
(Elaborada pela autora, 2022)

A **análise da paisagem, na escala regional**, foi realizada com base em informações oriundas de imagens dos satélites da série Landsat, a partir dos quais foram obtidas informações sobre a paisagem, tendo por referência os seguintes índices: índice de vegetação; índice de área construída; índice de sequestro de carbono; e temperatura de superfície. Tais informações balizaram o mapeamento e análise das mudanças ocorridas na área de estudo, quanto aos aspectos mencionados. O detalhamento da metodologia, então resumida, pode ser observado na seção 5.3.1.1 (p. 163). Já, a **análise da paisagem, na escala local**, considerou os CDPs de municípios selecionados, que apresentaram bons resultados quanto aos padrões verificados na avaliação da ocupação do território, municípios esses tendo sido identificados como sendo: Alto Feliz, Harmonia, Feliz, Maratá, Montenegro e Vale Real. Para tal, são utilizados, como dados de entrada para a classificação do uso e ocupação do solo, as bandas espectrais do satélite CBERS-4A. As classes de uso e ocupação do solo foram, então, avaliadas de acordo com métricas da paisagem. O detalhamento dos procedimentos realizados nessa etapa pode ser

conferido na seção 5.3.2.1 (p. 191). Também foi realizada uma **avaliação integrada dos resultados da análise da paisagem nas escalas regional e local**. Esta etapa se baseou no estudo das relações entre: as variáveis temperatura superficial e índice de sequestro de carbono (escala regional); a constituição da paisagem; e suas métricas (escala intraurbana). A metodologia para realização dessa etapa é apresentada na seção 5.3.3.1 (p. 222). O resumo ilustrativo da metodologia é apresentado na Figura 6.

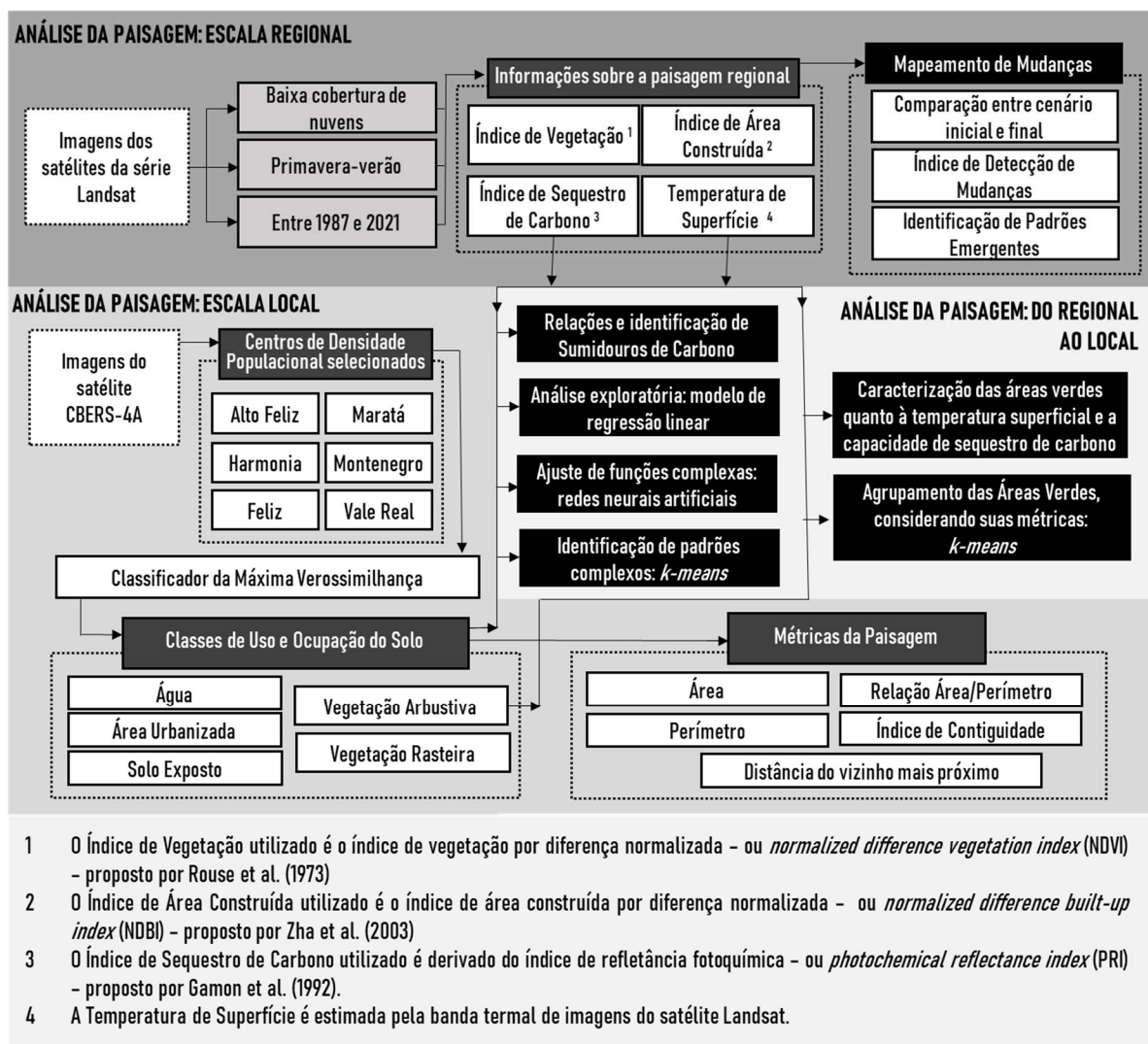


Figura 6: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para a análise da paisagem, nas escalas regional e local. (Elaborada pela autora, 2022)

O **sistema alimentar urbano** foi avaliado, inicialmente, com base na **caracterização da produção hortícola**, em todos os municípios da região. Nessa etapa, foram utilizados dados:

do Censo Agropecuário do IBGE (IBGE, 2017); da Plataforma Adapta Brasil; e do estudo Regiões de Influência das Cidades (IBGE, 2018). Em um segundo momento, foi analisada a **conexão urbano-rural** na produção hortícola, considerando a localização dos estabelecimentos agropecuários e dos CDPs, e a rede viária dos municípios. Por fim, foi avaliado o **potencial de produção urbana de alimentos**, nos CDPs dos municípios que tiveram seu uso e ocupação do solo classificados. As áreas identificadas como vegetação rasteira ou solo exposto foram agrupadas, por meio de uma análise multivariada, usando a técnica de clusterização *k-means*. O agrupamento levou em consideração aspectos trabalhados espacialmente nas seções anteriores, que são: o Índice de Inclusão/Exclusão Social; o Índice de Contiguidade dos Espaços; as densidades populacionais; e as temperaturas de superfície. A metodologia, a fim de aprofundar a compreensão dos sistemas alimentares urbanos, pode ser visualizada na Figura 7. Todos os procedimentos estão descritos na seção 5.4.1, página 254.

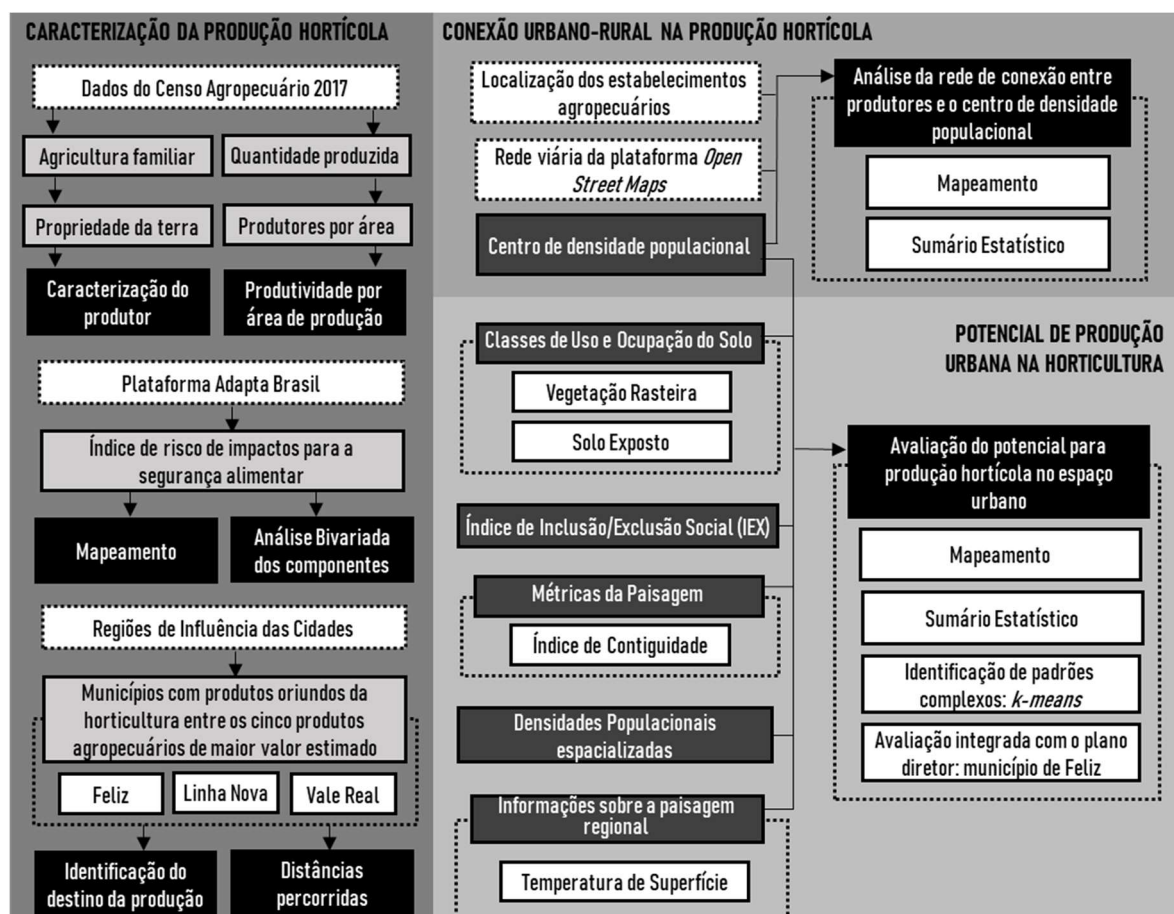


Figura 7: Fluxo ilustrativo da metodologia utilizada para o estudo do sistema alimentar urbano. (Elaborada pela autora, 2022)

2.3 ESTRUTURA DA TESE

O trabalho foi estruturado em 8 capítulos, incluídos o capítulo introdutório (capítulo 1) e o presente capítulo (capítulo 2), que apresenta, de forma geral, os procedimentos metodológicos. Os demais capítulos resultam do desenvolvimento das cinco etapas discutidas no item 2.1.

Com o cumprimento da **Etapa I**, foi elaborado o **capítulo 3**, no qual é apresentado o referencial bibliográfico, que norteou a realização do estudo. É discutida a importância e influência do **pensamento complexo no estudo das cidades**, e como sua compreensão, como um sistema vivo, pode contribuir para a resolução de problemas essencialmente complexos. Também são identificadas as **ferramentas, metodologias e tecnologias**, que permitem uma avaliação da complexidade dos sistemas urbanos, sendo discutida a importância da disponibilidade de dados, nesse contexto. Adicionalmente, é verificada a aplicação de metodologias que consideram a complexidade urbana, tomando como contexto questões relacionadas à resiliência urbana, à luz da abordagem sistêmica.

As discussões propostas na **Etapa II** estão apresentadas no **capítulo 4**, no qual é apresentada a área de estudo, e onde são discutidas as unidades de análise e é justificada a escolha da área de estudo, identificada como uma comunidade adequada à avaliação proposta.

A **Etapa III** é apresentada no **capítulo 5**, no qual são desenvolvidas, inicialmente, as discussões acerca da ocupação do território da área de estudo, onde serão apresentados os resultados relativos aos aspectos de: **densidade, centralidade e rede de cidades**. Em seguida, são apresentados os resultados da análise da **inclusão socioespacial no ambiente construído**, expondo como ferramentas de geoanálise podem nortear ações orientadas para a sustentabilidade urbana. É, também, realizada a **análise da paisagem**, nas escalas regional e intraurbana, e estudada como a geoanálise, associada a técnicas de inteligência artificial, podem contribuir no entendimento de padrões multivariados. Por fim, os resultados das análises são integrados em uma avaliação do **sistema alimentar urbano**.

O **aplicativo web** SIG Vale da Felicidade, proposto na **Etapa IV**, tem suas principais ferramentas e funcionalidades apresentadas no **capítulo 6**.

Em cumprimento à **Etapa V**, no **capítulo 7**, são apresentadas as conclusões, com base no referencial teórico e nos resultados obtidos. Em seguida, são apresentadas as **referências bibliográficas**.

3 O PENSAMENTO SISTÊMICO NO ESTUDO DO AMBIENTE URBANO: CONCEITOS, FERRAMENTAS E DESAFIOS

3.1 COMPREENDENDO AS CIDADES COMO SISTEMAS COMPLEXOS

O pensamento científico tem evoluído, gradualmente, em direção a um entendimento transdisciplinar das problemáticas: mais do que relacionar diferentes campos do conhecimento, a articulação entre eles revela-se fundamental para a proposição de soluções aplicáveis à realidade. Ramadier (2004) descreve essa distinção como: “através do relacionamento, busca-se uma realidade comum às diferentes entidades que compõem o objeto; enquanto, por meio da articulação, busca-se a coerência entre os múltiplos níveis de realidade que compõem um objeto”.

É justamente na articulação entre os campos disciplinares que Morin (2005) situa a necessidade do pensamento complexo, do conhecimento multidimensional. Para o autor, falta, na própria ciência humana, um princípio que o enraíze no universo natural. Trata-se do que o autor considera um dinamismo estabilizado, um estado de desequilíbrio, constantemente recuperado ou compensado. A relação entre o sistema e o meio ambiente não é apenas de dependência, uma vez que essa própria relação o constitui.

No contexto do estudo das cidades, o entendimento da cidade como um elemento vivo vem inspirando àqueles que aprofundam estudos sobre a analogia das cidades com sistemas naturais (ALEXANDER, 2002; JACOBS, 1992; LYNCH, 1982; MCHARG, 1969). É fundamental que essa consideração não se limite tão-somente à condição de uma figura de linguagem, e que se faça presente, também, na prática dos projetos e na condução da gestão urbana (FARR, 2013; NEWMAN e JENNINGS, 2008). Essa é, sobretudo, uma visão que, de forma conceitual ou aplicada, considera o ambiente construído como devendo estar embasado em processos transdisciplinares e articulados, característica de sistemas complexos.

Factualmente, as cidades são sistemas nos quais está presente a interação entre diversos aspectos: dinâmica social e territorial; economia; infraestrutura – elementos que se influenciam mutuamente. O resultado da tentativa de gerenciar a vida urbana, observando apenas um desses elementos, é limitado, sendo eficaz apenas pontualmente. Dessa maneira, um entendimento holístico dos aspectos da vida urbana se faz necessário:

Enquanto essa abordagem mentalmente prática é endereçada para a maior parte das atividades de curto prazo da administração das cidades, há muito mais a considerar a respeito das cidades, no médio e longo prazo. Isto se torna mais crítico para questões urbanas em longos horizontes de tempo e em lugares onde as práticas de engenharia falham. Então, a ênfase muda para diferentes tipos de problemas, que lidam com dinâmicas socioeconômicas típicas, como: pobreza urbana, desemprego, crime e violência, crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nem é preciso dizer que estes problemas são complexos, exigindo entendimento do histórico e do contexto, pois as receitas prontas inexistem (BETTENCOURT, 2015, p. 241).

Com a maior parcela da humanidade vivendo nas cidades, a compreensão de sua ordem não é menos significativa do que a ordem descoberta nas ciências da física, química ou biologia: o progresso humano na compreensão dessas disciplinas mudou a visão do mundo e, portanto, o mesmo pode acontecer no estudo das cidades, desde que sejam entendidas de maneira diferente (ALEXANDER, 2002). É nesse sentido que será abordado, a seguir, como o entendimento das cidades, como sistemas vivos, pode contribuir para a resolução de seus problemas, essencialmente complexos.

3.1.1 As cidades como sistemas vivos

Tradicionalmente, o estudo das cidades envolve diversas disciplinas, como a antropologia, a geografia, a engenharia, a economia e a arquitetura. Conforme apresenta Ramadier (2004), pontes interdisciplinares foram construídas, graças às transferências de conhecimento: muitos dos modelos da geografia estão baseados na física e na antropologia; a psicologia e a sociologia foram inspiradas pela semiologia; a arquitetura se inspirou nos modelos biológicos e psicológicos. Mais do que a transferência de saberes entre as disciplinas urbanas, a transdisciplinaridade no estudo dos sistemas urbanos é fundamental para a compreensão de seus elementos, interconexões e funções.

O paradigma mecanicista, entretanto, é o que predomina, na prática, na análise dos processos urbanos. Com soluções predominantemente setorizadas em disciplinas, a visão compartimentada aumenta a lacuna entre a pesquisa e a tomada de decisões. Lynch (1982), ao abordar a visão mecanicista, aponta que tal visão reduz as questões urbanas a problemas de engenharia: a cidade passa a ser considerada como composta por um grande número de pequenas partes autônomas, com funções específicas, que se unem, como o fazem as peças de uma máquina.

Ainda que a aplicação da metáfora da máquina para a cidade tenha sido importante para a arquitetura modernista e para o planejamento setorial, é importante destacar que, onde implementada, essa abordagem tem levado a projetos sociais disfuncionais, resultando em baixa efetividade no uso do território, vultosos custos de transportes, poluição e congestionamentos (BETTENCOURT, 2015).

Avaliações isoladas vêm se mostrando incompletas para atender às reais demandas das cidades: uma visão holística dos processos urbanos é fundamental para que sejam pensadas soluções estratégicas, não limitadas, apenas, à resolução de problemas imediatos. É possível observar a convergência de diversos aspectos da teoria dos sistemas complexos ao urbanismo, dada sua demanda plural e coletiva, condicionada por fatores culturais, econômicos, jurídicos, políticos e, destacadamente, climáticos. A prática do trabalho, entretanto, é organizada com base em paradigmas da simplificação.

Essa avaliação conduz a uma concepção diferente relativamente a cidades, ao considerá-la em seu caráter orgânico. Este enfoque está presente em outra tradição de planejamento urbano, que se orienta pela analogia existente entre as cidades e os organismos ou ecossistemas, o que, naturalmente, tende a destacar aspectos complexos associados ao meio urbano (JACOBS, 1992; LYNCH, 1982).

Batty (2012) destaca a transição do pensamento de “cidades como máquinas”, para “cidades como organismos”, as quais refletem, de modo mais efetivo, a sua real pluralidade e diversidade. Lynch (1982) coloca a visão holística como sendo a principal contribuição da teoria orgânica das cidades, ao considerar o todo, em suas várias funções, onde os diversos elementos que o constituem estão em constante e solidário intercâmbio, e, tal como o processo e a forma, são indivisíveis.

Ao observar o ambiente urbano como um sistema, as conexões entre os diversos elementos são evidenciadas, de modo que novas relações importantes na organização e dinâmica urbana podem ser identificadas, a partir das quais soluções sustentáveis poderão ser planejadas e adotadas. O planejamento urbano, a partir desse enfoque, passa a aspirar criar um ambiente urbano dinâmico e evolutivo, no tempo e no espaço (RAMADIER, 2004; RIZZO; GALANAKIS, 2015). Esta visão pode ser identificada como permeando os estudos urbanos, desde meados do século XX.

Jacobs (1992), em obra publicada originalmente em 1962, descreve o desenvolvimento do pensamento científico em três etapas: inicialmente, a capacidade de lidar com problemas de **simplicidade elementar**; em um segundo momento, a capacidade de lidar com problemas de **complexidade desorganizada**; por fim, a capacidade de lidar com **problemas de complexidade organizada**. Os problemas urbanos são semelhantes aos das ciências biológicas, nos quais os vários elementos que os compõem estão inter-relacionados, de forma que “as variáveis são diversas, mas não são desordenadas; elas estão inter-relacionadas em um todo orgânico” (JACOBS, 1992, p. 286). A autora aborda formas alternativas de planejar o espaço urbano, em busca da gestão da **complexidade organizada**.

Dessa maneira, não existe um único fator que, se compreendido, irá esgotar as explicações de tudo, mas sim várias questões articuladas. As principais propriedades das cidades, enquanto sistemas complexos, são discutidas pela autora, sendo sumarizadas por Bettencourt (2015), em cinco propriedades gerais: i) heterogeneidade; ii) interconectividade; iii) escalabilidade; iv) causalidade circular; e v) desenvolvimento.

A quantidade de propriedades relacionadas aos sistemas complexos pode dificultar a prática da administração das cidades por métodos convencionais. Para o entendimento das relações complexas, Jacobs (1992) sugere que técnicas de análise, considerando duas variáveis ou complexidades desorganizadas, possam ser adotadas como métodos secundários. Para a compreensão das cidades, nesse contexto, são sintetizados, na Figura 8, os principais modos de reflexão, segundo a autora:

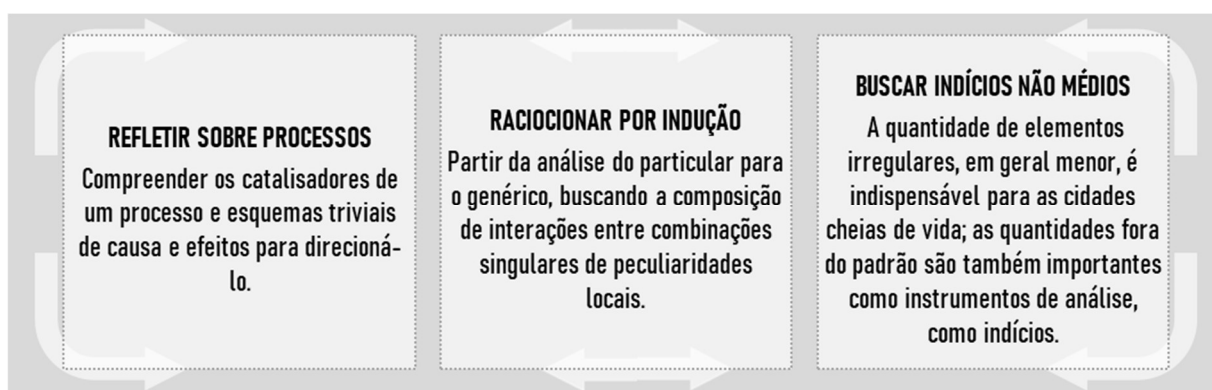


Figura 8: Modos de reflexão para a compreensão das cidades.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em Jacobs, 1992)

Esses modos de reflexão estão entre si correlacionados e podem ser empregados de maneira integrada, uma vez que as conclusões resultantes de cada etapa têm o potencial de alimentar e aprimorar as demais. É comum a todas elas a presença de um fator de caráter intuitivo, proveniente das peculiaridades do local e passível de ser o mais facilmente percebido pelos próprios habitantes da cidade, ainda que representem elementos estatisticamente incoerentes. Isso reforça a importância da gestão comunitária participativa, de maneira próxima aos planejadores urbanos, associando, conforme esclarece a autora, “o que tem mais vida” às ferramentas, técnicas e conhecimentos formais.

Outra contribuição nesta área é devida a Alexander (1965), ao abordar dois modos de reflexão sobre como sistemas menores se organizam para formar um sistema complexo: a visão da cidade como uma “árvore”, ou como uma “semi-trama”. As formas de organização e as relações entre os elementos do sistema podem ser observadas nos diagramas esquemáticos, a seguir apresentados, conforme o modelo da semi-trama (Figura 9 (a)) e da árvore (Figura 9 (b)). Observa-se que, no modelo da árvore, a relação entre dois conjuntos é restritiva, uma vez que dois conjuntos podem, apenas, estar totalmente contido um no outro, ou totalmente desconectados.

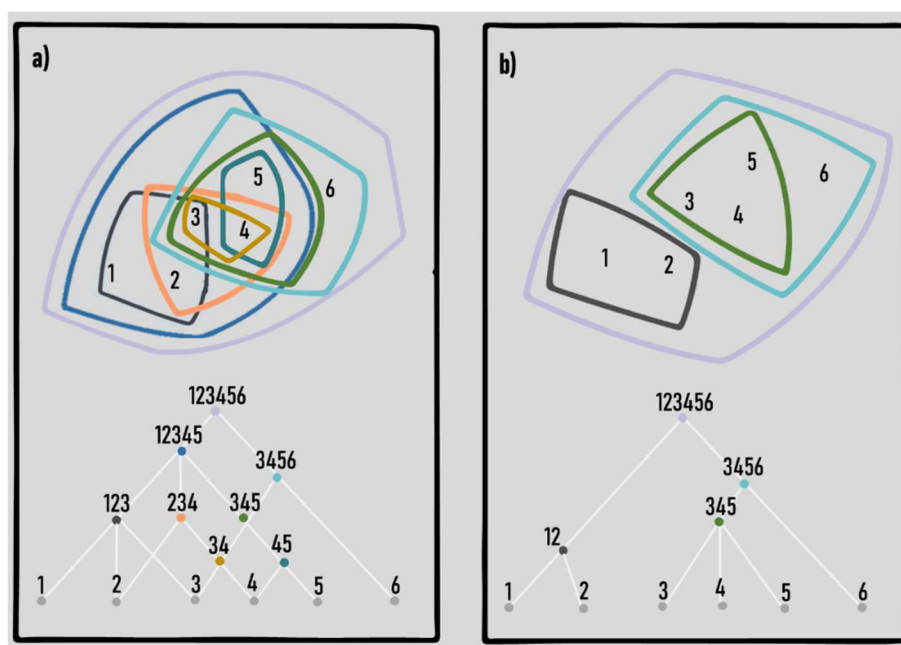


Figura 9: Diagramas de organização de conjuntos em a) semitrama; e b) árvore.

(Elaborada pela autora, 2022, com base em Alexander, 1965)

O autor alerta para o fato de que a simplicidade contida no modelo estrutural de uma “árvore” pode distorcer a concepção de cidades. A setorização proposta pelo modelo conduz a uma estanqueidade, não condizente com a dinâmica urbana, conduzindo às dissociações e inequidades espaciais, identificáveis nas cidades planejadas. O autor observa que, nas cidades espontâneas, que surgiram e se desenvolveram de maneira mais orgânica, a estrutura observada segue o modelo da “semi-trama”, no qual estão presentes as sobreposições dos sistemas que as compõem.

A compreensão dos sistemas urbanos como “árvores” pode se mostrar, a priori, mais imediata para o entendimento dos sistemas complexos, considerando a forma como a mente humana habitualmente associa padrões. Todavia, essa consideração pode, de acordo com o autor, conduzir à troca da riqueza e humanidade da cidade viva, por uma certa simplicidade conceitual, que ocorre com a vantagem única de facilitar o trabalho dos projetistas, dos planejadores, administradores urbanos e incorporadores imobiliários (ALEXANDER, 1965).

Alexander (2003) refere-se, também, à mudança do paradigma da análise mecanicista, referindo alguns fatores aplicáveis ao entendimento científico do ambiente construído, e que requerem um novo foco, centrado na questão da complexidade: *o valor*, que não pode ser dissociado do atendimento às necessidades funcionais; *o contexto*, uma vez que cada elemento deve complementar e compor a totalidade; *o projeto e criação*, capazes de promover a unidade; *o sentimento humano*, que deve ser tomado como um aspecto objetivo na construção dos espaços; *a conexão ecológica, sustentável e biológica* com o território; *o acordo social*, quanto à tomada de decisões em um sistema complexo; e *a beleza* emergente da forma, como objetivo e resultado dos processos.

A abordagem holística de McHarg (1969) também corrobora o entendimento das cidades como sistemas complexos. Ao propor o conceito de planejamento ecológico, o autor considera que a apropriação do solo urbano requer uma avaliação integrada dos componentes que compõem a natureza local, como solos, drenagem, recursos naturais e culturais. O método de análise proposto envolve a identificação dos processos atuantes no ecossistema e dos elementos que os integram, possibilitando o seu mapeamento e a contraposição de informações para análise. Com base em conceitos precursores à análise, contando com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o autor apresenta a ferramenta e suas potencialidades a um público mais amplo. Atualmente, os avanços em termos de ferramentas computacionais possibilitam a

observação dos processos interativos dinâmicos que compõem a natureza, permitindo situar as cidades nesse contexto, de forma objetiva.

Na linha do entendimento da complexidade das cidades como ecossistemas, Newman e Jennings (2008) discutem como é possível reintegrá-las a seu ambiente biorregional, e como é possível fazer o planejamento urbano com base nos princípios de organização natural. Os autores defendem a ideia de cidades como ecossistemas, em si mesmas, com materiais, fluxos de energia e sistemas de informações complexos.

Farr (2013) adiciona à discussão, também, a forma como os sistemas sociais podem ser melhorados, com a sua integração à natureza, ressaltando a influência do estilo de vida adotado pela comunidade, na sustentabilidade de uma cidade. O autor destaca a abordagem essencialmente integradora do urbanismo sustentável, que visa retomar, de forma sinérgica, as relações entre os sistemas humanos e naturais. Nessa abordagem integradora, torna-se possível projetar os sistemas com maior eficiência:

O Santo Graal do projeto integrado é quando as economias permitem que sistemas inteiros sejam eliminados. É possível que benefícios econômicos e ambientais imensos resultem da integração entre sistemas de alto desempenho de: transporte, água, esgoto, iluminação e energia elétrica e edificações [...] que consumam pouco, ou nenhum recurso, e produzam pouco, ou nenhum resíduo (FARR, 2013, p. 41).

O autor ressalta, ainda, que os benefícios de um projeto integrado podem ocorrer quase sem nenhum custo adicional, quando comparados às intervenções em uma única edificação; a diferença básica entre esses tipos de intervenções resulta, em geral, da falta de entendimento sobre os sistemas humanos, e da complexidade envolvida nesse tipo de abordagem.

Como uma maneira prática de abordar as inter-relações fundamentais necessárias à sustentabilidade urbana, Farr (2013), em uma definição rigorosa do que seria um bairro sustentável, aponta-o como aquele que consegue integrar cinco atributos, que são sintetizados na Figura 10:

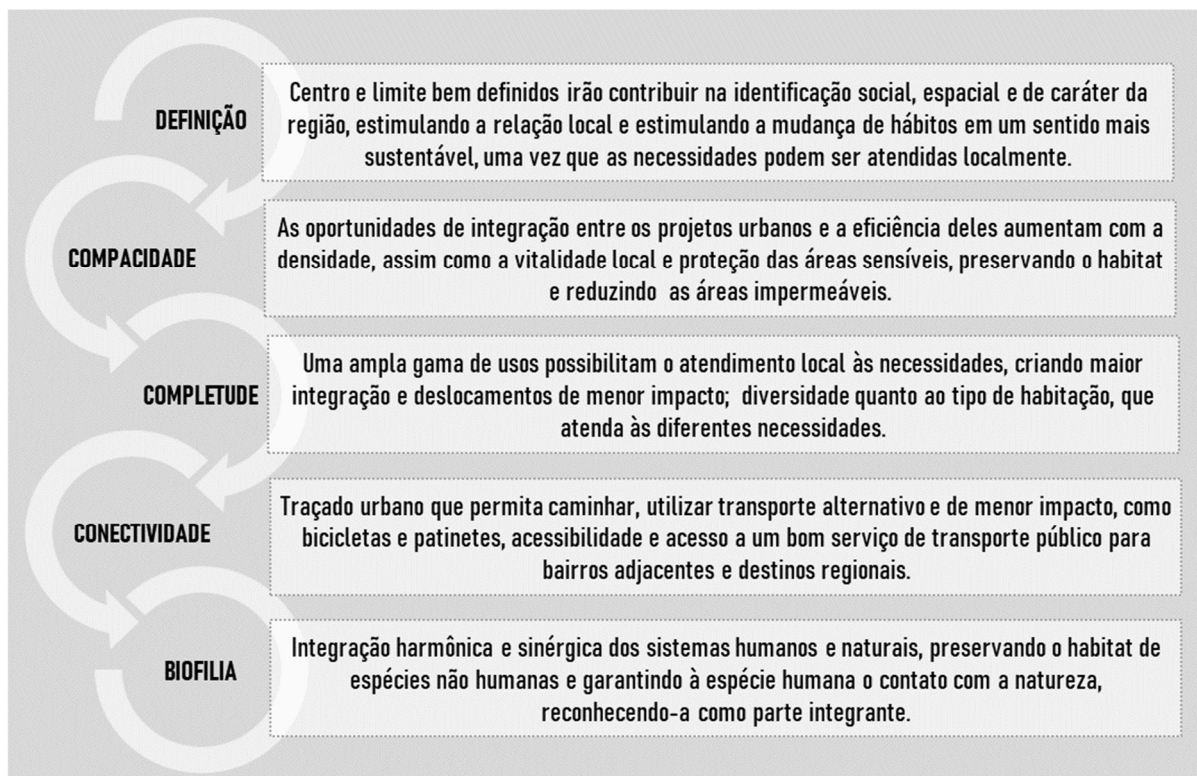


Figura 10: Atributos integrados de um bairro sustentável.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em Farr, 2013)

Rizzo e Galanakis (2015) discutem a respeito do que consideram ser “escombros das recentes crises ambientais e econômicas”, uma nova abordagem de urbanismo transdisciplinar, situada na interseção da pesquisa socioespacial, da teoria da complexidade e do ativismo urbano. Os autores destacam a real necessidade de reconciliação das ciências exatas, sociais e da filosofia, na resolução de questões práticas. As atividades científicas e técnicas têm, desta forma, como uma finalidade em comum, promover avanços em direção à sustentabilidade.

3.1.2 A completude dos sistemas vivos

O caminho para a sustentabilidade consiste em adaptar o ambiente urbano, com base em padrões e processos de ecossistemas naturais sustentáveis, alcançando regeneração ecológica, comunidades saudáveis e economias viáveis, dentro de suas biorregiões (NEWMAN; JENNINGS, 2008). Nesse contexto, Alexander (2002) refere 15 propriedades determinantes, no funcionamento do que o autor denomina de sistema vivo: trata-se de uma visão da realidade física, que é dominada pela existência de uma certa estrutura, uma completude.

Essas propriedades são apresentadas na obra *The Nature of Order*, publicada originalmente em 1980. Responsáveis pelo comportamento funcional da completude, as propriedades são apresentadas com um nível de abstração que permite aplicá-las a diferentes áreas do conhecimento, que tratem do que pode ser definido como um sistema vivo, permitindo interpretações em diversos domínios.

Morin (2005) destaca a impossibilidade do conhecimento completo, como um dos axiomas da complexidade, que implica, fundamentalmente, no reconhecimento da incompletude e das incertezas. Para esclarecer uma aparente contradição, é importante frisar que o termo utilizado por Alexander (2002), para descrever uma das principais características dos sistemas vivos, *wholeness*, aqui traduzido como completude, não diz respeito a uma verdade estática e imutável, mas serve para descrever como os assim designados sistemas apresentam uma forte coerência interna:

Como “completude”, quero referir qualquer conjunto espacial relativamente coerente, com o entendimento de que diferentes conjuntos podem ter graus de coerência relativamente diferentes. A totalidade [...] é uma ordem dos diferentes conjuntos e sistemas, aninhados e sobrepostos, de acordo com seu grau de coerência; em suma, a coerência relativa de todo o sistema de conjuntos e subconjuntos, em uma parte do espaço (ALEXANDER, 2002, p. 8, tradução da autora).

Nesse sentido, a totalidade de um sistema é criada a partir da integração de suas partes componentes estruturadas, cujas interrelações estruturais e funcionais não são compreendidas pelas partes componentes, quando desagregadas (CHRISTOFOLETTI, 2001). No intuito de analisar de forma prática a aplicação da teoria de Alexander (2002), as propriedades que descrevem os princípios de vivacidade observados na natureza estão sintetizadas na Figura 11, e, no presente trabalho, serão abordadas dentro do contexto do ambiente construído.

<p>NÍVEIS DE ESCALA</p> <p>Na completude, centros são definidos em diferentes níveis de escala. Centros maiores e menores se influenciam mutuamente.</p>	<p>CENTROS FORTES</p> <p>Elemento-chave da completude, que não a centraliza necessariamente de forma geométrica, mas em termos de foco. Cada centro é formado por outros centros, em diferentes escalas.</p>	<p>LIMITES</p> <p>Com a magnitude adequada ao centro que corresponde, conectam-no ao contexto, Compõem-se em várias escalas, delimitando e reforçando as funções uns dos outros.</p>
<p>REPETIÇÃO ALTERNADA</p> <p>Os centros tornam-se mais fortes quando repetidos em diferentes níveis, alternadamente. Quando a repetição é aplicada a todos os elementos, há a completude.</p>	<p>ESPAÇO POSITIVO</p> <p>Uma forma distinta e coerente dos espaços é tão importante quanto as formas dos edifícios que o rodeiam. Esses espaços precisam ser positivos, de modo que não sejam desperdiçados.</p>	<p>BOA FORMA</p> <p>Configuração da completude, composta por partes com um senso geométrico simples, constituídas de centros e nas quais o espaço é positivo e definido.</p>
<p>SIMETRIAS LOCAIS</p> <p>A existência da inter-relação e sobreposição de simetrias locais tendem a formar centros fortes e criar coerência.</p>	<p>INTERTRAVAMENTO PROFUNDO E AMBIGUIDADES</p> <p>A interpenetração gera ambiguidades: centros maiores passam a compartilhar centros menores, que os fusionam e evitam transições abruptas.</p>	<p>CONTRASTE</p> <p>Quando centros relacionados apresentam contrastes, suas relações são fortalecidas: trata-se da diversidade trazendo unidade, e não segregação.</p>
<p>GRADIENTES</p> <p>Os centros se fortalecem gradualmente, da menor para a maior escala. Trata-se de uma resposta natural às mudanças.</p>	<p>RUGOSIDADE</p> <p>Uma estrutura orgânica apresenta irregularidades decorrentes de sua adaptação ao contexto, associada à liberdade na formação desses padrões.</p>	<p>ECOS</p> <p>Autossimilaridade aproximada ou estatística entre padrões em diferentes escalas, seguida pelos fractais naturais.</p>
<p>VAZIOS</p> <p>Exercem a função de centros implícitos, identificáveis nas maiores escalas.</p>	<p>SIMPLICIDADE E CALMA INTERIOR</p> <p>Coerência entre os padrões internos, que podem ser classificados em centros de diferentes níveis.</p>	<p>NÃO SEPARAÇÃO</p> <p>Um centro não pode ser separado de seus centros adjacentes, uma vez que compõem a totalidade e estão interconectados.</p>

Figura 11: Resumo esquemático das 15 propriedades fundamentais dos sistemas vivos.

(Elaborada pela autora, 2022, com base em Alexander, 2002)

A primeira propriedade abordada, os **níveis de escala**, reflete a variação de tamanhos que um sistema vivo pode assumir: além de expressar a forma como a dinâmica local ocorre, a escalabilidade revela que é possível abordar o problema da cidade observando o conjunto de assentamentos, de todos os tamanhos, buscando replicar o tipo de processo que acontece em todos eles – as unidades mais básicas têm comportamento similar, em todas as instâncias, especificamente na vida social e nos lugares físicos, expressando-se da mesma forma, tanto em pequenas, como em grandes cidades.

A escalabilidade dos problemas urbanos, uma questão essencialmente relacionada aos sistemas complexos, também é discutida pelo autor em publicação anterior: *A Linguagem de Padrões* (ALEXANDER et al., 1977). A maneira como esta obra é estruturada revela a importância dos níveis de escala, no entendimento dos problemas urbanos: primeiramente, são apresentados os padrões aplicáveis à grande escala, como regiões e cidades; a discussão passa para a média escala, com padrões aplicáveis a bairros e conjuntos de edificações; por fim, são apresentados os padrões relacionados à pequena escala, abrangendo edificações, ambientes, nichos e detalhes construtivos.

À propriedade supracitada são associados os **centros fortes**: assim como os níveis de escala, a presença de um centro não é uma ocorrência isolada; ele constitui apenas um elemento de um conjunto de diferentes centros, em diferentes níveis, relacionados e integrados entre si. São os elementos-chave da completude de um sistema, e, no contexto urbano, podem ser identificados com a observação de gradientes.

Jacobs (1992) corrobora com a importância dada à centralidade, tomando-a como o elemento mais importante da complexidade. Para exemplificar, a autora menciona o caso dos parques mais reconhecidos pelas comunidades, que são considerados como sendo um centro – podendo assumir, como tal, a escala de um cruzamento principal, ou de um ponto de parada, um local de destaque.

Os **limites** que circundam um centro têm a finalidade de destacar a sua presença, unindo-o ao todo que o envolve e ajudando a delimitar e reforçar as funções uns dos outros, criando zonas de separação e integração. Os limites de um centro são determinantes para defini-lo. É importante destacar que, para que efetivamente funcionem como tal, é necessário que esses limites apresentem a mesma magnitude do centro, em si. Essa regra é aplicável a todos os níveis, e os limites, em todas as escalas, permeiam a estrutura analisada.

Farr (2013) ratifica essa ideia de maneira prática, ao ressaltar, como atributo indispensável à sustentabilidade urbana, a existência de centros e limites bem definidos: vizinhanças assim determinadas estimulam a existência de uma rede social, fortalecendo os vínculos com o ambiente e a responsabilidade para com ele. Este conceito leva, também, a uma melhor eficiência no uso do solo e ao encorajamento dos deslocamentos a pé. Trata-se de uma concretização da máxima de René Dubos: “pense globalmente, aja localmente”.

As **repetições alternadas**, em diferentes escalas, fortalecem os centros aos quais estão associadas. O senso de ordem de um elemento, de alguma maneira, está associado aos padrões que se repetem alternadamente – destaca-se a importância da alternância, uma vez que, sem ela, a repetição é banal e não agrega vida à estrutura. Quando a repetição é aplicada a todos os elementos, entidades, espaços e sequências, há a completude nos resultados: trata-se de uma forma de oscilação.

No contexto do ambiente urbano, Alexander et al. (1977) propõem o padrão de Distribuição das Cidades (Padrão 2), que sugere a distribuição populacional gradual de cidades, com as seguintes características: i) população distribuída uniformemente, em termos de diferentes tamanhos; ii) cidades distribuídas espacialmente, de forma que cada categoria de tamanho de assentamentos seja distribuída homogeneamente. Uma ilustração deste cenário é exposta na Figura 12. Além da repetição alternada, este padrão está intimamente relacionado a outras propriedades, uma vez que envolve, também, a questão da escalabilidade e cria regiões integradas, fortalecendo seus centros.



Figura 12: Padrão de distribuição de cidades.
(Elaborado pela autora com base em Alexander et al., 1977)

Os **espaços positivos** sugerem que os espaços abertos devem estar integrados aos centros aos quais se relacionam. Conceber todos os espaços como positivos é fundamental para a completude e vivacidade dos sistemas: cada uma das partes deve exercer uma função e representar uma totalidade, em si; toda parcela do espaço que tem uma forma positiva torna-se extremamente útil, não havendo desperdício de espaços.

Em uma abordagem urbana, esclarece Guerreiro (2008), é habitualmente considerado como espaço negativo o fundo sobre o qual os edifícios se assentam: essa visão conduz a uma atribuição de menor importância a esses espaços, na cidade moderna. Quando uma cidade é produzida de forma orgânica, entretanto, os espaços e as edificações quase não se distinguem, apenas constituem formas distintas. Quando tanto a forma, quanto a função do conjunto são complexas, não é possível compreendê-las tão somente pelo conhecimento específico das partes, uma vez que estas funcionam como um sistema.

Essencialmente relacionada à positividade dos espaços, a **boa forma** ocorre quando cada parte de espaço pode ser considerada positiva e definida. Trata-se, não apenas de se construir o espaço de forma esteticamente mais apreciável, mas, também, de modo que funcione de maneira mais profunda e efetiva. São espaços complexos, porém constituídos por formas simples, que estabelecem centros.

Lynch (1982), em sua *Teoria da Boa Forma das Cidades*, enfatiza que a vitalidade de um lugar se deve ao efeito conjunto do espaço e da sociedade que o ocupa. O autor sugere um conjunto de dimensões de desempenho, para a boa forma das cidades, destacando que nenhuma delas

representa uma dimensão única; todas se referem a um conjunto de qualidades, que apresentam uma base comum e que podem ser medidas de alguma maneira comum. As dimensões estão sintetizadas na Figura 13, e quando estiverem relacionadas à qualidade do assentamento, é imprescindível que os metacritérios de eficiência e justiça sejam adicionados.



Figura 13: Dimensões de desempenho, para a boa forma da cidade.
(Elaborado pela autora, com base em Lynch, 1982)

As **simetrias locais** estão associadas às simetrias individuais, em cada nível, além de sua associação ao nível global. A existência de centros fortes requer a presença de inter-relação e sobreposição de simetrias. É importante destacar, entretanto, que a simetria perfeita não é uma característica dos espaços vivos, e que a simetria, por si só, não garante a vivacidade do local. Quando a simetria é imposta ao espaço, torna-se irrelevante.

Em muitos casos, o emprego de simetria local é utilizado para estabelecer centros, uma vez que centros fortes geralmente apresentam simetrias locais fortes dentro deles; igualmente, localidades com simetrias fortes, geralmente, também constituem centros fortes. Este recurso une centros menores ao todo, criando ainda mais coerência (ALEXANDER, 2005).

A propriedade de simetria, presente em diversos temas ambientais, pode ser observada também nas cidades. Retornando ao já referido padrão de Distribuição das Cidades (Padrão 2), é possível observar a existência de simetrias locais na distribuição proposta para cidades de diversos tamanhos, ocorrendo um compartilhamento de centros. Destaca-se, também, o padrão Trama de Vias Rurais (padrão 5), que também se refere à existência de simetrias em estradas e lotes de pequenas propriedades rurais, criando uma estrutura regular (ALEXANDER et. al., 1977).

Na escala do ambiente construído, as simetrias locais podem não ser óbvias, em uma primeira avaliação. O reconhecimento dessas simetrias, entretanto, pode ser facilitado por ferramentas computacionais, úteis em aplicações diversas. Diferentes estudos identificam simetrias locais. Por exemplo, Xue et al. (2019), com a detecção automatizada de simetria arquitetônica, a partir do emprego de conjuntos de nuvens de pontos 3D, representando um modelo digital das cidades avaliadas. Por sua vez, Hu et al. (2020) desenvolveram uma abordagem baseada em imagens do *Google Street View* e em algoritmos de aprendizagem profunda (*deep learning*), para o mapeamento de *canyons* urbanos, resultando em uma classificação baseada em simetria e geometria complexa.

A **ambiguidade** visual entre os blocos de construção e os espaços entre eles, resultante de uma interpenetração mútua, favorece a constituição de um **profundo intertravamento** de suas características. Nestes casos, os centros são fortemente associados ao seu entorno, quase que se confundindo com ele. O centro e seu entorno se interpenetram, com centros intermediários sendo compartilhados com centros maiores, simultaneamente à ocorrência de sua fusão.

Fica assim claro como a interconexão profunda entre os elementos que compõem a cidade torna-os ambíguos, eliminando fronteiras disciplinares, uma vez que eles são interdependentes. Jacobs (1992) traz à luz esta discussão com uma visão prática, evidenciando como tudo na cidade é sutilmente interconectado em rede: assuntos de desenvolvimento econômico e saúde são conectados a lugares físicos e a serviços urbanos, e esses, por sua vez, aos orçamentos, nos níveis municipal e individual. Rizzo e Galanakis (2015) destacam essa ambiguidade como um elemento constituinte da complexidade inerente aos sistemas urbanos, propondo o urbanismo transdisciplinar, como uma estrutura metodológica para acolher esses elementos.

Quando centros associados apresentam **contrastos**, suas relações são fortalecidas. No contexto das cidades, pode-se destacar: o próprio tamanho da mancha urbana no cenário regional, com suas concentrações próprias e específicas de pessoas e de número de habitações. A questão

central se estabelece no fato de que a unidade só pode ser criada a partir da diversidade; entretanto, é importante ressaltar que os contrastes contribuem para unificar, não para segregar.

Lynch (1982) associa a saúde de uma comunidade à sua heterogeneidade, à diversidade de pessoas e lugares, que, em constante variação, contribuem para o funcionamento saudável dessa comunidade. Cada parte desempenha uma função, que, assim, em seu conjunto, não se tornam iguais ou repetitivas, mas diversificadas, sendo reforçadas em sua diversidade.

É importante destacar que a presença de fatores de diversificação em grande número, seja de pessoas, usos, edificações, atividades de trabalho, parques ou de ruas, não irá garantir a diversidade urbana, caso estejam funcionando como elementos de sistemas inertes, de baixa vitalidade, e que sustentam apenas a si mesmos. A diversidade surge quando esses sistemas estão inter-relacionados, proporcionando-lhes grande vitalidade (JACOBS, 1992).

Numa avaliação prática, Farr (2013) destaca que a excelência de um bairro está diretamente associada a “uma mistura bem calibrada de usos do solo e tipos de habitação”. Essa diversidade é fundamental para tornar os lugares mais vivos, uma vez que a convivência de pessoas, em diferentes horários e com diferentes interesses, contribuirá para uma maior dinâmica urbana. Também essa diversidade terá um papel fundamental na redução dos deslocamentos, uma vez que será possível suprir, localmente, as necessidades de moradia, trabalho e consumo.

Especialmente, os **gradientes** são uma resposta natural às mudanças: à medida que os bairros crescem, promovem gradientes, que, por sua vez, formam centros. A constituição de um gradiente verdadeiro requer que a morfologia dos elementos seja capaz de sustentar uma mudança gradual de tamanho e de características, ao longo do tempo.

Observáveis nos transectos urbanos, os gradientes ocorrem na escala das cidades, conforme Alexander et al. (1977), quando as densidades caem sistematicamente a partir de um centro urbano. Neste contexto, destaca-se, também, o padrão de Anéis de Densidade (Padrão 29), proposto pelo autor, que explica de que modo os gradientes podem se formar a partir de um núcleo, e, inclusive, promover o seu fortalecimento.

À propriedade da **rugosidade** o autor associa, também, a questão da flexibilidade no emprego de padrões, na formação de sistemas vivos, não sendo requerido, necessariamente, o emprego de determinados padrões, mas flexibilizando a sua composição, de acordo com as demandas e

limitações locais. A rugosidade está relacionada à necessidade de adaptação às especificidades associadas a cada ambiente.

Jacobs (1992) aponta de que forma tais especificidades podem se manifestar, assemelhando-as aos “chamarizes”, pequenos elementos em uma paisagem maior e sem singularidades destacáveis. Como ilustração, a autora cita alguns exemplos de como essas singularidades podem ser identificadas. No âmbito econômico, por exemplo, é possível observar a existência de estabelecimentos comerciais diferenciados; culturalmente, uma escola ou teatro incomuns; no âmbito social, com a existência de figuras públicas, locais de lazer ou moradores que financeira, vocacional ou culturalmente sejam diferenciáveis.

Essas singularidades não podem ser desconsideradas, uma vez que conferem ao ambiente uma vivacidade e força criativa, que são fundamentais para a capacidade de criação de sistemas vivos. Em uma outra esfera, é o equilíbrio entre a flexibilidade e uma delimitação clara e eficiente, que irá conferir aos sistemas urbanos a capacidade de acompanhar, de forma dinâmica, o uso e ocupação de seu território, ao mesmo tempo em que confere uma orientação a esse processo.

Já os **ecos** se referem à autossimilaridade aproximada ou estatística entre padrões, em diferentes escalas. Para Alexander (1979), em cada escala coexistem, tanto a repetição de padrões globais, como variações locais. Essa ideia se assemelha à geometria fractal, presente em diversos padrões na natureza, nos quais é possível observar uma estrutura complexa e organizada hierarquicamente.

As cidades têm uma estrutura fractal bastante distinta, pois suas funções são autossimilares, em muitas ordens ou escalas. Nelas são identificados: bairros, distritos e setores; diferentes ordens de redes de transporte; assim como uma ordenação na hierarquia do lugar, que espelha a dependência econômica do local, em relação ao global e vice-versa; todos ilustrando exemplos de estrutura fractal (BATTY E LONGLEY, 1994).

As escalas em que esses ecos são observáveis podem ser, tanto espaciais, englobando bairros, distritos, cidades; ou temporais, com padrões que se repetem ao longo das horas, dias, anos. Batty e Longley (1994) aprofundam a discussão da cidade como um fractal, tal qual os organismos complexos, que evoluem e se modificam de acordo com as regras e condições locais, que, por sua vez, manifestam uma ordem mais global, em muitas escalas e épocas.

O padrão de Distribuição das Cidades (Padrão 2), de Alexander et al. (1977), também apresenta particularidades associadas aos ecos, uma vez que é possível observar a repetição do padrão de distribuição espacial de cidades, em diferentes escalas, quando analisados regionalmente.

Os **vazios** são elementos fundamentais de equilíbrio, em regiões com grandes contrastes, podendo exercer a função de centros implícitos, identificáveis nas maiores escalas. O vazio ocorre em sistemas complexos para manter sua completude.

Quando tomado o ambiente construído como referência, o termo “vazio urbano” pode ter uma conotação negativa, associada à fragmentação e descontinuidade no processo de ocupação, resultando em espaços subutilizados. Entretanto, é importante reconhecer que esses espaços podem ser considerados como potenciais elementos para a requalificação da cidade. Solà-Morales (2002) define que tais espaços contêm, tanto a ambiguidade, quanto a multiplicidade de significados dos espaços que apresentam uma dupla condição, uma vez que também podem ser encarados como uma “área disponível, cheia de expectativas, de forte memória urbana, com potencial”.

Em uma escala mais ampla, a relação entre a vivacidade dos ambientes e os vazios a eles associados está mais ligada ao equilíbrio na ocupação do território, como abordado nos padrões supramencionados – Distribuição das Cidades (Padrão 2) e Anéis de Densidade (Padrão 29). Destaca-se, também, o conceito proposto por Duany et al. (2009), do transecto urbano-rural, um espectro de distintas intensidades de ocupação do solo.

Em qualquer das escalas analisadas, longe de representarem elementos ociosos e que não agregam vivacidade, esses vazios exercem funções importantes para as cidades, como sistemas complexos: a de potencial elemento para a requalificação do espaço intraurbano, e a de equilíbrio na ocupação do território. Alguns estudos ilustram essa questão de forma prática, indicando como a utilização desses espaços pode exercer funções primordiais para a sustentabilidade das cidades, como é o caso da produção urbana de alimentos (KUHN, 2016; MOSCHETTA, 2013).

A **simplicidade e calma interior** estão associadas, em uma primeira instância, ao maior nível de abstração e subjetividade entre as propriedades analisadas, uma vez que envolve a percepção das pessoas em relação ao meio. Uma análise mais profunda, entretanto, irá relacionar esta propriedade à coerência inerente aos sistemas complexos, demonstrando-se consistentes com suas próprias condições.

Esta propriedade é o resultado da exclusão de todos os elementos desnecessários, uma simplificação que torna mais profundas as relações entre o homem e o meio. Trata-se, em última instância, do resultado intuitivo da aplicação das demais propriedades.

É possível destacar, também, que a propriedade está fortemente associada à eficiência desses sistemas complexos. Jiang (2015) destaca a maneira como os sistemas assim configurados podem ter seus centros clusterizados, reunidos em grupos similares, onde, em cada uma das classes, o senso de simplicidade e calma é fortemente destacado. Morin (2005) contesta a afirmação de que o pensamento complexo conduz à eliminação da simplicidade, e afirma que, ao contrário, ele integra tudo aquilo que adiciona ordem, clareza e distinção ao conhecimento.

Uma vez alcançada a coerência entre os componentes individuais, o sistema perde o sentido quando decomposto, já que cada elemento se conecta e exerce um papel importante no todo: essa é a expressão final da propriedade da **não separação**. O centro não pode ser separado de seu contexto. Desta forma, não há isolamento absoluto em um sistema, pois cada elemento integra um sistema maior.

A não separação resulta da natureza complexa das cidades, caracterizadas como sistemas dinâmicos: a forma como os centros exercem influência no seu entorno, ou, no contexto regional, como as cidades se influenciam mutuamente, resultam da ocorrência da propriedade de não separação nos ambientes de grande vivacidade.

Ainda que uma análise conceitual das propriedades avaliadas seja uma etapa fundamental para definir uma nova abordagem às questões urbanas, considerando a complexidade a elas inerente, a completude de um sistema urbano pode ser compreendida como uma estrutura matemática abstrata, definida no espaço. Ela é, dessa forma, mensurável: seu nível de vivacidade pode ser objetivamente observado e descrito com o emprego das 15 propriedades (ALEXANDER, 2002; ALEXANDER, 2005).

3.1.3 Relações entre a resiliência e a vivacidade dos sistemas urbanos

A resiliência das cidades está relacionada ao nível de tolerância a impactos de diferentes naturezas, até que seja necessária sua reorganização, em torno de um novo conjunto de estruturas e processos. Essa tolerância está relacionada à capacidade da cidade em manter, simultaneamente, as funções humanas e ecossistêmicas. O conceito de resiliência urbana,

entretanto, ainda não é nem unânime, nem está claramente delimitado. A depender do campo de estudo, ele poderá requerer diferentes níveis de precisão para a construção de uma base conceitual, que compreendem, desde uma metáfora genérica, a representações por meio de índices quantificáveis.

Embora o conceito de resiliência urbana, enquanto uma ideia emergente, constitua um tema em permanente discussão, constata-se que suas ideias norteadoras estão fortemente alinhadas ao entendimento das cidades como sistemas complexos. Também, a resiliência urbana dificilmente poderá ser explicada sob uma perspectiva reducionista, uma vez que a compreensão da resiliência de suas partes, individualmente, permitirá uma compreensão apenas muito limitada sobre a capacidade de recuperação do sistema, como um todo.

Os sistemas urbanos são distintos dos sistemas newtonianos, nos quais causa e efeito podem ser linearmente medidos, e dos sistemas aleatórios, nos quais não é possível identificar padrões discerníveis (DESOUZA e FLANERY, 2013). Entende-se que, para uma adequada compreensão do ambiente urbano, a sua abordagem como um sistema adaptativo complexo mostra-se adequada, uma vez que leva em consideração a não-linearidade causal de seus processos:

A teoria da complexidade desafia o reducionismo e nos ensina que os efeitos podem ter um "emaranhado irreduzível de causas" e, portanto, prejudicar as alegações de previsibilidade e controlabilidade. A resiliência sócio-ecológica aplica a teoria da complexidade aos sistemas sócio-ecológicos interconectados, e depende significativamente, mas de forma alguma exclusivamente, de ferramentas analíticas baseadas em sistemas, para compreender sua dinâmica relacional (WILKINSON, 2011. p. 158, tradução da autora).

Desta forma, as respostas aos desafios da sustentabilidade, sob o viés da resiliência urbana, requerem a construção de uma estrutura integrada de análise, que possibilite lidar com a conexão entre as diferentes escalas dos sistemas considerados, bem como de suas capacidades e vulnerabilidades, além dos períodos de tempo envolvidos. Nos sistemas urbanos complexos, devem ser concebidas estratégias de resiliência de curto, médio e longo prazo, considerando-se que a natureza de recuperação, em cada uma delas, é multidimensional. Desta forma, uma transição em direção à sustentabilidade deve ser a meta de longo prazo, operacionalizada por meio de sua gestão em suas diferentes escalas (CHELLERI et al., 2015).

O processo de retorno ao equilíbrio, também nos sistemas urbanos, é dinâmico, o que confere às cidades a possibilidade da criação de padrões auto-organizáveis ou emergentes. Hopkins

(2014) destaca três atributos essenciais à auto-organização dos ecossistemas resilientes: a diversidade, a modularidade e a robustez de *feedbacks*. A **diversidade** amplia as possibilidades de manutenção da estabilidade, por também ampliar o número de caminhos de retroalimentação de tais sistemas. E esta diversidade inclui a heterogeneidade de pessoas, instituições, espécies, negócios, entre outros elementos que integram o sistema, e que são caracterizados, não apenas pela quantidade de elementos, mas também pela variedade de suas funções. A **modularidade** do sistema está diretamente associada à maneira como esses elementos estão conectados. Assim, uma estrutura modular, interconectada localmente, reduz a vulnerabilidade da rede em sua totalidade. Por sua vez, a **robustez de *feedbacks*** está associada à rapidez e à força com que uma mudança, em uma parte do sistema, afeta o todo.

É possível observar uma relação entre os atributos de resiliência supramencionados e as propriedades que contribuem para a vivacidade dos sistemas urbanos – já mencionada na seção 3.1.2 –, sendo esta relação ilustrada na Figura 14.

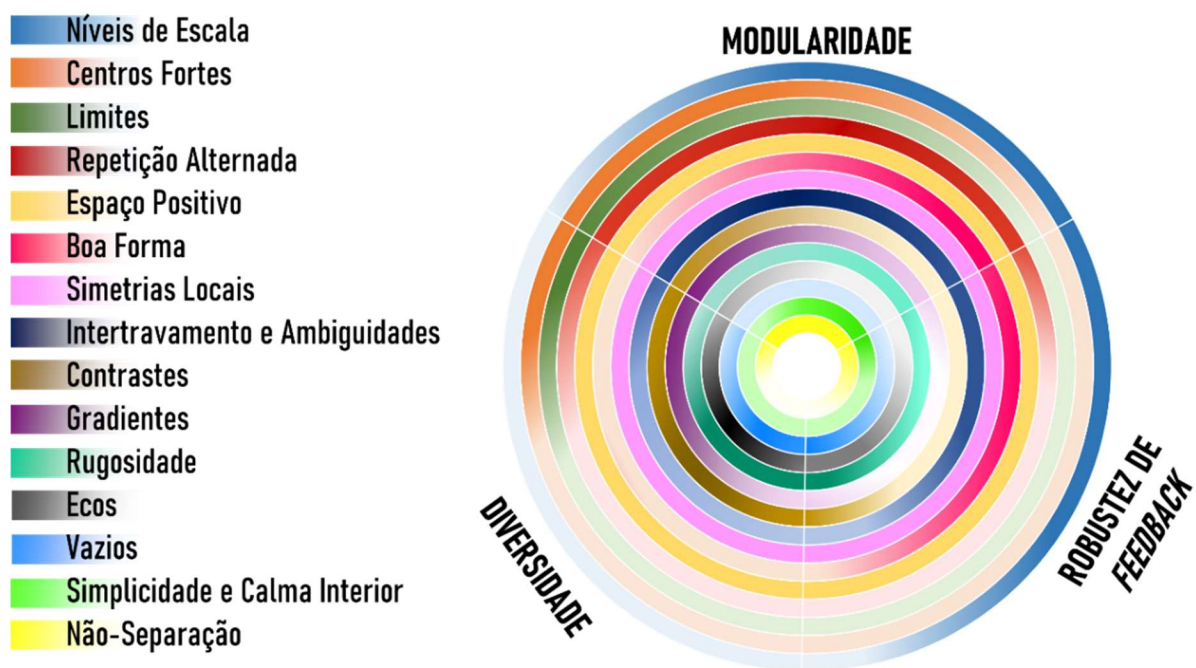


Figura 14: Relação entre os atributos de resiliência e as propriedades dos sistemas vivos.
(Elaborado pela autora, 2022)

É possível constatar que, embora em níveis e formas diversas, os sistemas urbanos com maior vivacidade apresentam maior aptidão para responder a impactos, mostrando-se, assim, mais

resilientes. Hopkins (2014) ilustra a resiliência urbana, no que concerne a sistemas alimentares, valendo-se do seguinte exemplo: uma comunidade que tem suas demandas por alimentos atendidas localmente, tem a sua resiliência aumentada. A resiliência urbana requer ações de maior efetividade, com ciclos de respostas mais robustos, que aproximem os agentes às consequências de suas ações, tais quais aqueles que caracterizam as redes locais.

Associada à natureza dinâmica das cidades e de seus ecossistemas, verifica-se uma incerteza associada a seus processos. Wilkinson (2011) destaca que admitir tal incerteza constitua uma das principais estratégias de resiliência. A autora adiciona que tais estratégias poderão, também, estar relacionadas: à criação de condições para a recuperação e renovação, após um choque; à colaboração entre diferentes áreas do conhecimento para a aprendizagem; e à criação de novas oportunidades para a auto-organização. O conceito do ciclo adaptativo passa a ser, dessa maneira, central para a resiliência socioecológica: ao desafiar a visão tradicional da sucessão dos ecossistemas, a natureza adaptativa e evolutiva dos ciclos é considerada e agrupada em escalas.

Partindo da concepção da cidade como um sistema auto organizável, em pontos críticos de estabilidade, as ideias associadas à resiliência podem impulsionar a política urbana para um planejamento mais integrado e flexível, no qual o planejador deverá trabalhar, de modo a priorizar a inovação, a criatividade e a visão holística. Uma vez realizados, os planos e previsões se tornam essenciais partícipes da dinâmica urbana (COLLIER et al., 2013; HOPKINS, 2014; LAWRENCE, 2004; PORTUGALI, 2008).

Chelleri et al. (2015) identificam a busca pela resiliência urbana como um processo de ações ou respostas constituído por três etapas básicas, associadas a perspectivas de curto, médio e longo prazo. Essas etapas estão ilustradas na Figura 15.

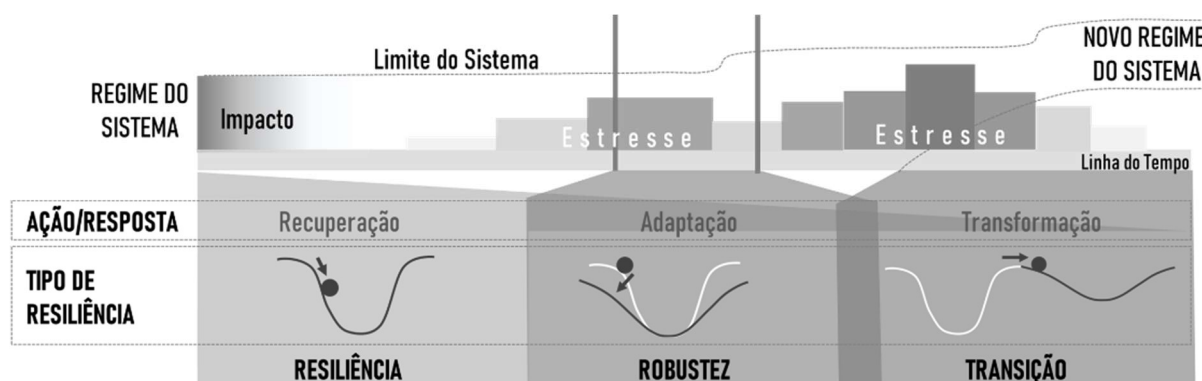


Figura 15: Estágios da busca pela resiliência urbana, a curto, médio e longo prazos.
(Elaborado pela autora, com base em Chelleri et al., 2015)

Uma primeira ação, de **recuperação**, no sentido da busca de uma maior resiliência frente aos impactos sofridos pelo complexo sistema urbano, estará relacionada à perspectiva de curto prazo. A segunda etapa inclui processos de **adaptação**, buscando o robustecimento do sistema, com a promoção de ajustes que permitam robustecê-lo, de modo a lhe permitir enfrentar mudanças reais ou esperadas, uma vez que os limites dos sistemas urbanos podem ter sido alterados, em consequência de choques eventualmente ocorridos. Já, na perspectiva de longo prazo, poderá ser requerida a **transformação** estrutural do sistema, associada a uma adequação de seus atributos fundamentais, ou seja, um processo de transição, que identificará a conclusão do estabelecimento de um novo regime.

Conforme destacam Newman e Jennings (2008), na busca por visões para as cidades, é necessário refletir a respeito das qualidades distintivas, as quais proporcionarão inspiração e orientação na jornada em direção à sustentabilidade, o que também se constituirá em uma influência positiva para a regeneração ecológica de suas regiões. Uma visão positiva, no processo de transição para um novo regime do sistema das cidades, pode ser um contribuinte importante para a orientação técnica do processo em direção à sustentabilidade urbana; esta visão, igualmente, fornecerá inspiração, quando alicerçada em exemplos reais de comunidades fortalecidas por ações locais.

Essas iniciativas são fundamentadas na busca pela estruturação de modos de vida com um consumo energético mais baixo. Os assentamentos humanos e comunidades, em sua atual organização, estão vulneráveis a choques energéticos decorrentes dos picos de petróleo. Apenas por meio de uma atuação coletiva e criativa será possível conceber formas de vida mais

conectadas e proativas, nas quais sejam reconhecidos os limites biológicos do planeta Terra (CHAMBERLIN, 2009; HOPKINS, 2014).

Newman e Jennings (2008) destacam que a busca da resiliência significa avançar na construção de economias locais integradas e mais próximas das economias biorregionais, escalas nas quais o relacionamento entre as pessoas, e destas com os ecossistemas, ocorrem de forma mais eficaz. A retomada do “agir localmente” deve incluir o atendimento das necessidades essenciais e contar com a capacidade coletiva da comunidade de desenvolver resiliência, apoiada em um processo de realocização. O fortalecimento das redes locais para o atendimento das necessidades, adquire, nesse contexto, um papel fundamental para aumentar a resiliência das cidades.

A conceituação, a implementação e o gerenciamento de mudanças nos sistemas sociais, relacionados a processos tecnológicos e ecológicos, têm sido centrais no estudo das transições de sustentabilidade. Uma visão que considere a complexidade dos sistemas urbanos, irá incorporar a transição, como um elemento dinâmico e em harmonia com regimes em que operam. Esses regimes determinarão as questões de pesquisa, a seleção de atores nos processos participativos e indicarão o escopo das soluções possíveis em cada contexto. A principal função da gestão da transição para a sustentabilidade é, justamente, direcionar sistematicamente a transição desse regime complexo, em direção aos objetivos da sustentabilidade, de maneira a possibilitar a identificação de nichos e das interconexões existentes (BASU et al., 2019).

O processo de transição poderá requerer um longo prazo para a sua implementação, já que envolve toda uma reestruturação de um sistema complexo. Os processos de adaptação e transição, por sua vez, poderão ocorrer concomitantemente. Na prática, as ações que possibilitem a adaptação de um sistema, de modo a permitir uma transição para um novo regime, é uma escolha de caráter sociopolítico – crítica e complexa – que, geralmente, acontece quando o sistema se aproxima de limiares perigosos ou indesejados. Entretanto, é importante destacar que a transição de um sistema possibilita, também, oportunidades, em termos de recombinação de estruturas e processos, renovação do sistema, assim como a emergência de novas trajetórias, mais sustentáveis (CHELLERI et al., 2015; WILKINSON, 2011).

Desta maneira, é importante entender a transição como um processo que não necessariamente deva ser evitado. Pelo contrário, ele deverá, primeiramente, ser bem compreendido, de modo a possibilitar a otimização de seu gerenciamento, para que, com o emprego de ferramentas

compatíveis com sua natureza complexa e com a devida inclusão de estratégias exequíveis e adequadas à realidade local, possa permitir a efetiva transição para um novo regime do sistema.

Na prática, a transição das cidades para um futuro resiliente deve ser operacionalizada por meio de ferramentas identificadas com a complexidade desse processo, e que sejam capazes de sintetizar escalas e sistemas múltiplos, por meio dos quais seja possível a adaptação dinâmica. É importante, entretanto, que estejam associadas à realidade local e que não sejam demasiadamente intrincadas, de modo a permitir o desenvolvimento de exemplos alcançáveis e demonstráveis.

Ferramentas colaborativas e holísticas podem auxiliar na construção de estratégias e planos de ação direcionados à transição para a sustentabilidade. A inovação na abordagem das questões urbanas, por meio de ferramentas adequadas ao entendimento de sua natureza sistêmica e complexa, fornece uma base para a pesquisa transdisciplinar e cria pontes com a prática profissional (COLLIER et al., 2013; LAWRENCE, 2004).

3.1.4 Considerações sobre o pensamento sistêmico aplicado ao estudo do ambiente urbano

A discussão desenvolvida nas seções anteriores, buscou embasar o entendimento do ambiente urbano como um sistema complexo. Foram reportados aspectos conceituais associados ao estudo das cidades, a partir de uma revisão da literatura, na qual é estudada a relação humana com o ambiente construído e a sua inclusão no ambiente natural, a partir da compreensão das cidades como constituindo sistemas vivos.

Essencialmente, as visões abordadas têm, em comum, seu caráter transdisciplinar, propondo uma avaliação articulada entre as diversas dimensões que compõem o ambiente urbano e buscando entender os resultados da interação humana com o meio em que vive. A visão holística proposta se alinha com a de sistemas complexos, nos quais o todo é considerado maior do que o somatório das partes que o constitui. É percebida, portanto, a forte relação entre a percepção da cidade como um sistema vivo e o entendimento de sua complexidade, quando examinado segundo uma ótica multidimensional.

No sentido de aprofundar a compreensão sobre essa totalidade, ou completude, sem, no entanto, a pretensão de esgotar ou dominar seu entendimento, uma análise das propriedades dos sistemas

vivos, proposta por Alexander (2002), permitiu realizar uma aplicação desses princípios gerais ao contexto urbano. Destaca-se, também, o importante papel dos **centros** nesse contexto, em função de sua influência nos sistemas vivos e por interagirem entre si.

Em um sentido mais amplo, esta análise pode conduzir ao entendimento de algumas estruturas complexas, extrapolando sua aplicação para além do estudo e planejamento das cidades. Podem ser apontadas algumas relações que ratificam essa compreensão: i) assim como nos sistemas complexos, nos sistemas urbanos, podem ser observadas, tanto a composição de seus elementos, como as relações existentes entre eles; ii) nos ambientes urbanos de grande vivacidade pode ser percebida uma ordem específica, uma organização que funciona como uma completude; iii) o número de elementos que compõem os sistemas urbanos, quando em alto nível de conectividade, pode torná-los suficientemente autônomos.

É neste contexto que se torna possível identificar uma profunda conexão entre o entendimento das cidades como sistemas vivos e complexos, e sua aptidão para o enfrentamento de desafios relacionados à sua resiliência e sustentabilidade. Compreender os fenômenos emergentes da articulação dos processos que compõem a cidade é um pré-requisito essencial para a proposição de soluções mais eficientes e coerentes, e, assim, mais sustentáveis.

A visão holística dos processos urbanos, entretanto, ainda não foi plenamente incorporada à prática da concepção, planejamento e gestão das cidades. Neste ponto, é importante referir a preocupação de Morin (2005) sobre a necessidade de distinguir a complexidade, da ideia de “uma verdade assepsiada, e que, desta maneira, não poderá ser operacionalizada”. Para evitar este risco, é importante que, além do entendimento conceitual, esta visão seja fundamentada em metodologias e ferramentas transdisciplinares, que estejam acessíveis aos profissionais ligados ao estudo das cidades. As diversas disciplinas podem estar articuladas, sem, necessariamente, fundirem-se.

O surgimento de novas tecnologias, associado a uma maior capacidade de processamento e a um maior volume de informações, vem contribuindo para o entendimento dessas relações complexas e ampliando suas aplicações. Revisitar os conceitos abordados neste capítulo, com o suporte dessas ferramentas, representa uma etapa importante para incluir a **complexidade** na rotina dos estudos urbanos. Isso deve ocorrer, não em um sentido tecnocrático, mas como auxílio para a tomada de decisões. As novas tecnologias e a quantidade de dados disponíveis,

constitui um ferramental valioso no sentido de revelar padrões não identificáveis por meio da análise tradicional, sendo este o tema a ser abordado na seção seguinte.

3.2 FERRAMENTAS NA ANÁLISE DOS SISTEMAS URBANOS

A natureza complexa das cidades permite a construção de novos diálogos, teóricos e filosóficos. A necessidade de se trabalhar com fronteiras mais fluidas entre as disciplinas é apontada por diversos estudiosos do espaço urbano (RAMADIER, 2004; RIZZO; GALANAKIS, 2015). Na prática, entretanto, os processos de trabalho são desenvolvidos de forma simplificada, gerando uma falta de clareza e, muitas vezes, requerendo o retrabalho em planos e resultados.

A princípio, a ideia de uma análise técnica, ou matemática, desses sistemas pode parecer paradoxal, uma vez que uma das premissas básicas do pensamento complexo é o reconhecimento de que é impossível dominar todas as interações. Em contrapartida, modelos, ainda que simplificados, possibilitam compreender seus componentes, interfaces, dinâmicas, trocas e atratores.

Enquanto no paradigma cartesiano a simplificação seja necessária para entender um método, a visão sistêmica permite considerar a complexidade e, com base em informações locais, buscar indícios sobre o funcionamento dos sistemas, enquanto uma totalidade (PESCI; MENEGAT, 2014). Essa perspectiva reforça a necessidade de se buscar entender as cidades enquanto sistemas de complexidade organizada. Desconsiderar essa característica poderia resultar na perda da vivacidade urbana; por outro lado, considerar a complexidade, sem um nível de organização, torna a cidade caótica, impossível de ser vivida e compreendida. Nesse sentido, aumentar o nível de complexidade organizada dos sistemas urbanos é essencial para uma melhor compreensão dos seus problemas, tal qual eles se apresentam (JACOBS, 1992; SALINGAROS, 1998).

Para tal, é necessário tornar possível sua mensuração e sistematização, de maneira incluí-las na rotina do planejamento urbano. Pesci e Menegat (2014) discutem que a metodologia para projetar a sustentabilidade deve estar, essencialmente, baseada no conceito sistêmico, característico dos sistemas vivos. Para tal, é fundamental que sejam compreendidas as premissas do problema, para que, então, seja possível avaliar quais as funções do sistema são as que mais contribuem para o comportamento em análise.

O arquiteto Christopher Alexander pode ser considerado um dos pioneiros no entendimento da complexidade dos sistemas abertos. Introduzindo o uso de computadores, como ferramenta de projeto, o autor corrobora, por meio de um entendimento sistêmico e cibernético, também para o estudo dos espaços. Alinhada com uma perspectiva sistêmica, é desenvolvida uma teoria que é, inicialmente, marcada pelo tratamento algorítmico das relações socioespaciais (ANDRADE, 2011).

A visão de Alexander (2002) permite uma nova concepção sobre como a estrutura espacial pode se apresentar: sua imagem é orgânica, ininterrupta e possui uma estrutura física, chamada de estrutura viva ou totalidade; difere, desta forma, em essência, da visão mecanicista. Embora não apresente um modelo matemático para quantificar a completude, Alexander (2002) a define como uma grandeza mensurável.

Essa perspectiva permite um melhor entendimento conceitual dos problemas de complexidade organizada, contribuindo para a escolha do arcabouço metodológico adequado para conduzir esses estudos. Conforme destaca Andrade (2011), a proposta de Alexander compreende, não apenas a tomada de consciência sobre a complexidade das cidades, mas, também, sobre o entendimento dos processos cognitivos associados aos projetos para ela desenvolvidos, uma vez que o modelo de pensamento em árvore é também resultado da impossibilidade de o projetista, por si só, coordenar um conjunto tão amplo de ajustes, entre forma e contexto socioespaciais.

Novas tecnologias computacionais, associadas a uma capacidade de processamento de dados sem precedentes, assumem um papel inovador, muito contribuindo para o entendimento desses problemas. Há, entretanto, que se destacar o cuidado necessário ao abordar o papel de novas tecnologias, no entendimento holístico dos sistemas complexos:

Todos os que perguntam: “Como podemos usar o computador em arquitetura?” são perigosos, ingênuos e tolos. Tolos, porque só querem usar um instrumento antes de se saber **por que** utilizá-lo. Ingênuos, pois, como demonstrado [...] um computador pode fazer muito pouco, sem antes **ampliarmos a compreensão teórica** sobre sua forma e função. E perigosos, porque a sua preocupação pode nos impedir de alcançar esse entendimento teórico e de **perceber os problemas como eles efetivamente são** (ALEXANDER, (1980), destaque da autora e tradução de Andrade (2011)).

Com base nas reflexões do autor, alguns pontos devem ser destacados. Primeiramente, que é fundamental que a utilização de ferramentas computacionais vise auxiliar no entendimento de questões complexas: **o porquê** de sua utilização deve estar relacionado à sua capacidade de

revelar padrões, ocultos em uma primeira análise, auxiliando na compreensão de domínios e de suas relações. Sua aplicação deve ocorrer, não em um sentido tecnocrático, mas como auxílio para a tomada de decisão – dessa forma, antes da promoção da ferramenta em si, é importante destacar que sua função não é de fornecer respostas irrefutáveis, mas sim – e precisamente – de ampliar a capacidade humana de **perceber os problemas, tal como eles efetivamente são**.

Baseado nessa aplicação, Alexander (2002) destaca que determinações mais complexas das simetrias, centros e recursos podem ser empregadas para avaliar o espaço. As ciências da complexidade, apoiadas na ideia de que o todo é mais do que a soma das partes, vêm desenvolvendo um ferramental importante para o entendimento do meio urbano. Corroboram nesta direção, por exemplo, a utilização da geometria fractal (BATTY; LONGLEY, 1994) e das redes complexas (JIANG, 2015b), para o estudo das cidades.

O novo entendimento sobre como as cidades se ordenam e estruturam, associado à revolução digital, traz oportunidades de análise e modelagem inéditas. Trata-se de um cenário favorável à ampliação das fronteiras dos estudos urbanos: Batty (2013) descreve essa mudança de paradigma como *A Nova Ciência das Cidades*³, como parte integrante do desenvolvimento das ciências da complexidade. De acordo com o autor, novas camadas de interação estão sendo criadas à medida que a sociedade constitui fluxos de informação mais complexos (BATTY, 2011, 2013).

Ganha importância a elaboração de modelos que consideram, de forma simultânea e integrada, as camadas definidas como importantes para o funcionamento das cidades. Novos conjuntos de dados vêm sendo colocados em operação muito rapidamente, permitindo que muitas dessas teorias sejam testadas – devendo ser observado que muitos desses dados são dinâmicos no nível individual. Também, as novas técnicas de elaboração de modelos, incorporando estimativas, mineração de dados⁴ e reconhecimento de padrões, estão mudando a forma de se estudar e melhor entender o ambiente urbano, fazendo-se necessária a composição de equipes mais numerosas, com diferentes especialistas (BATTY, 2011).

³ *The New Science of Cities*, tradução nossa do título da obra que anuncia uma mudança de paradigma nos estudos urbanos.

⁴ Trata-se da prospecção de grandes bancos de dados, conhecida como *data mining*, na qual são buscados padrões consistentes e relações sistemáticas entre variáveis.

É nesse contexto que se destaca a necessidade de se avaliar as novas ferramentas e metodologias que, em um campo ainda pouco explorado, possibilitem a consideração da complexidade organizada no ambiente urbano. A inclusão de técnicas que incorporem a flexibilidade necessária para tratar de um sistema dinâmico e vivo – *como são caracterizadas as cidades, na seção 3.1* – pode evitar a elaboração de planos fragmentados e que tendem, pela geração massiva de novos dados e informações, a se tornarem obsoletos muito rapidamente. Diante disso, no presente capítulo serão discutidas, adicionalmente, algumas questões cruciais para situar o estudo das cidades nesse novo cenário.

3.2.1 Sistemas urbanos complexos na abordagem orientada por dados

Com a transição do mundo industrial para o pós-industrial, os limites da interação humana foram ampliados: a evolução dos processos computacionais e da comunicação via *wireless* permitiu que o custo de determinadas transações, impensáveis no passado, fosse reduzido consideravelmente, viabilizando interações que eram, anteriormente, excessivamente custosas (BATTY, 2013).

Esse cenário é potencializado, também, a partir da construção de bancos de dados de grande volume, sendo rapidamente desenvolvidos e em variedade sem precedentes, caracterizados como *Big Data*. O termo abrange não apenas o conjunto de dados estruturados, como conhecidos, de maneira clássica, no trabalho de analistas. Ele inclui, também, os dados não estruturados, semiestruturados e de fluxo, inerentes às tecnologias da vida cotidiana. A análise de conjuntos com quantidade expressiva de dados tem um papel fundamental na gestão das Cidades Inteligentes, possibilitando a verificação de correlações não claramente evidentes, embora presentes nas diversas camadas de informação associadas ao meio urbano (OSMAN, 2019).

Esses elementos, incluídos na análise e interpretação das interações urbanas, têm um papel fundamental no sentido de ampliar a compreensão dos componentes associados aos sistemas complexos que constituem as cidades. Decisões de governança urbana, orientadas pela leitura de dados e fazendo uso das tecnologias modernas de informação, podem ser mais eficientes, sustentáveis e úteis ao cidadão. Daí a expressão, utilizada com alguma frequência, no debate

sobre a importância da infinidade de dados facilmente disponíveis na atualidade, de que “os dados são o novo petróleo”⁵:

Os dados são um recurso essencial, que alimenta a economia da informação, como o petróleo alimentou a economia industrial. O *Big Data* promete uma infinidade de novos usos - a identificação e prevenção de pandemias, o surgimento de novos negócios e setores de negócios, a melhoria da saúde, qualidade e eficiência do atendimento e a proteção aprimorada do meio ambiente (HIRSCH, 2014, p. 2, tradução da autora).

A referência ao recurso natural de dependência mundial destaca a importância dos dados na economia da informação. Diferentemente do petróleo, entretanto, o fluxo de informações associado a dados, constitui um dos raros exemplos de fluxo com a capacidade de crescer, sem gerar poluição ou degradação ambiental. É fundamental que a possibilidade de acesso a esse novo recurso seja utilizada como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, que capacite os envolvidos na concepção, planejamento e gestão das cidades, a melhor compreender as interações complexas existentes no ambiente urbano.

Engin et al. (2020) entendem que essa infinidade de dados hoje disponíveis possa, com base em suas características, ser organizada da seguinte forma: dados pessoais; dados governamentais; dados abertos e públicos; e dados orgânicos e de *crowdsourcing*.

Os **dados pessoais** se referem àqueles relacionados a uma pessoa física ou identificável, conforme definição da *General Data Protection Regulation* (GDPR), o regulamento de proteção de dados da União Europeia. Essa regulamentação serviu de base a discussões sobre o tema, no Brasil, durante oito anos, até que foi sancionada, em 14 de agosto de 2018, a Lei Geral de Proteção de Dados brasileira, a Lei nº 13.709 (BRASIL, 2018). Os dados pessoais podem ser considerados como um dos mais relevantes ativos para o exercício de atividades empresariais, sociais e para acompanhamento de políticas. São exemplos de dados pessoais, aqueles constantes em cadastros, obtidos por GPS, sobre hábitos de consumo e de navegação na *web*.

Os **dados governamentais** são aqueles coletados, usualmente, por departamentos oficiais e outras organizações relacionadas. Em geral, tratam-se de dados pessoais, usados em nível agregado, para produzir estatísticas oficiais (ENGIN et al., 2020). Exemplificam esse tipo de

⁵ Referência feita pela diretora executiva da IBM, em entrevista disponível em: <https://siliconangle.com/2013/03/11/ibms-ceo-says-big-data-is-like-oil-enterprises-need-help-extracting-the-value>. Acesso em: 19 mar. 2020.

dados, os resultantes de Censos Demográfico e Agropecuário, que possibilitam a coleta de informações periódicas sobre a sociedade e a produção agropecuária brasileira – os dados obtidos, entretanto, são divulgados de forma agregada, em unidades mais amplas, a fim de preservar a privacidade e garantir a segurança das pessoas consultadas. No caso do Censo Demográfico, por exemplo, a menor unidade de agregação é o setor censitário.

Os **dados abertos** são aqueles disponíveis gratuitamente, podendo ser acessados, utilizados e compartilhados por qualquer cidadão, para diversas finalidades. Em geral, tratam-se de dados governamentais específicos, disponibilizados por meio de plataformas de dados abertos, podendo ser citados, como exemplos principais, as plataformas norte-americana (data.gov) e a britânica (data.gov.uk). No Brasil, a Lei de Acesso à Informação Pública, Lei 12.527/2011 (BRASIL, 2011), regula o acesso a dados governamentais, com o objetivo principal de democratização do acesso à informação pública. A plataforma de acesso disponibilizada é o Portal Brasileiro de Dados Abertos (dados.gov.br).

A disponibilização de dados abertos, em quantidade e qualidade adequadas, permite, além de maior transparência, a realização de estudos mais detalhados e conhecimento mais profundo sobre os setores estudados. Essa realidade não é, entretanto, comum, nos países em desenvolvimento: além da grande diversidade de escalas, e da fragmentação de dados entre os setores, os levantamentos mais detalhados e sistematizados são escassos, principalmente os relacionados a pequenas e médias municipalidades.

Nesse mesmo contexto, de países em desenvolvimento, os **dados orgânicos** assumem um papel importante. Conforme apresentado por Engin et al. (2020), esses dados são acumulados e recodificados, por meio de rastreamento automatizado de transações de todos os tipos, como: dados produzidos por mecanismos de pesquisa na web; aparelhos celulares; mídias sociais; e câmeras de trânsito.

Um dos processos para obtenção de dados orgânicos é o denominado de *crowdsourcing*, ou, em tradução livre, dados provenientes de multidões. Esses dados são coletados, aproveitando as informações e habilidades de muitos colaboradores, de forma livre e espontânea. Os dados obtidos por esse tipo de levantamento estão associados a uma margem de erro, decorrente da possibilidade de acesso totalmente livre, para inclusão de novos dados; contam, pois, com a colaboração de um grande número de indivíduos, o que resulta em um mapeamento flexível, dinâmico e constantemente revisado. Um exemplo desse processo de levantamento de dados, é

aquele que ocorre por meio da plataforma do *OpenStreetMap* (www.openstreetmap.org), um mapeamento colaborativo global, desenvolvido com o intuito de criar um mapa editável, e que se caracteriza como sendo de uso e de licença livres.

A transformação de **dados** em **informação** e **conhecimento** é uma das atividades mais importantes, em todas as sociedades. O fluxo associado ao saber sobre um determinado fenômeno, conforme apontado por Ackoff (1989), considera os seguintes elementos: os **dados**, símbolos sem significado, além da sua própria existência, que, quando interpretados, geram **informação**; esta, por sua vez, quando reconhecidas suas conexões e integrações, gera o **conhecimento**, que, quando compreendido em seus princípios básicos, constituirá a **sabedoria**. O processo evolutivo da transformação de dados em sabedoria é sintetizado na Figura 16, na qual é destacado, também, o seu caráter cíclico:

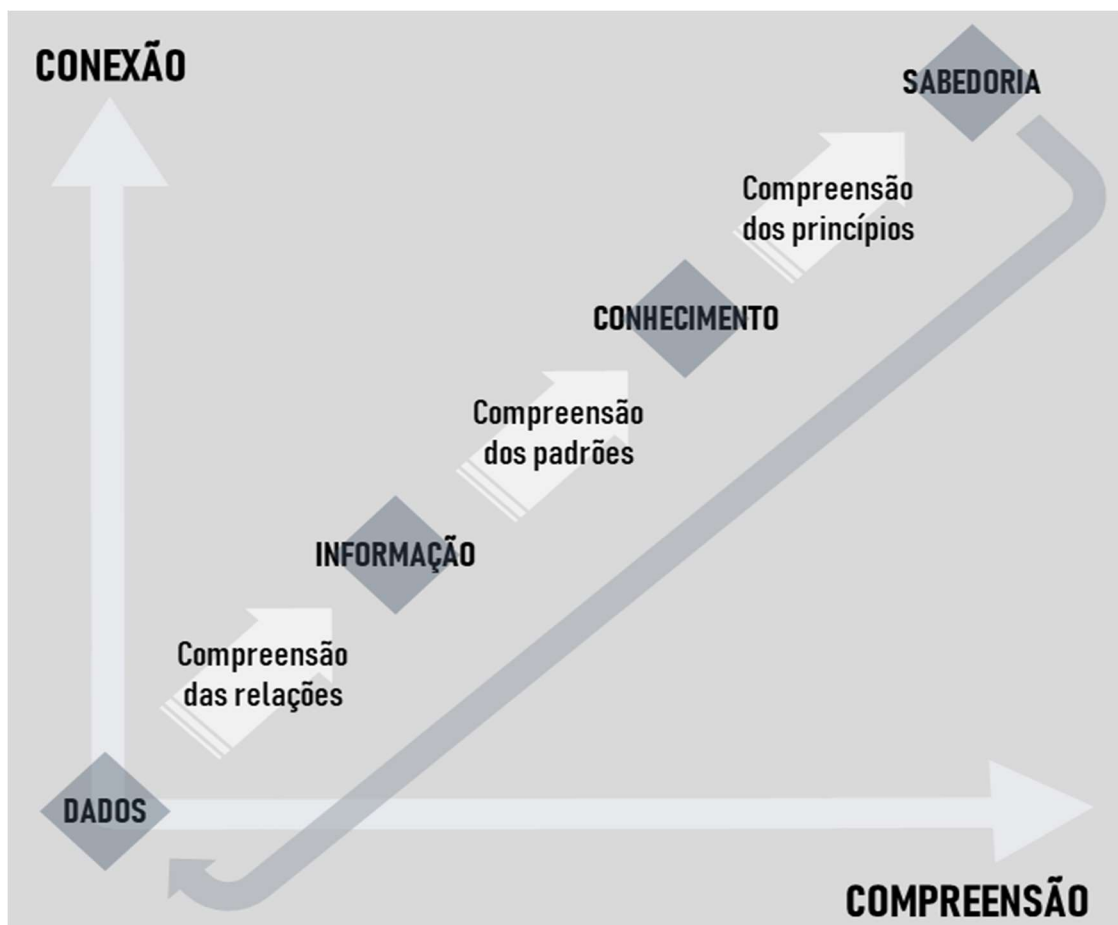


Figura 16: Etapas da compreensão de um fenômeno com base em dados.

(Elaborado pela autora, 2022)

Essa sabedoria, entretanto, não pode ser assumida como estática, principalmente na análise das cidades: o meio urbano constitui um sistema complexo, em constante evolução. A sabedoria associada a seus processos é dinâmica, no tempo e no espaço.

O acréscimo contínuo de dados, associado aos avanços dos recursos, que possibilitam analisar e compreender suas relações e identificar seus padrões, acelera o processo de avanços, também, do conhecimento. Neste contexto, os processos associados à gestão urbana evoluíram significativamente nos últimos anos, requerendo novas abordagens condizentes com seus crescentes níveis de complexidade. Diante disso, a gestão orientada por dados⁶, estratégia baseada no uso de dados, para orientar decisões e políticas, desempenha um papel de grande relevância na gestão das cidades.

Entretanto, o processamento e análise de um conjunto de dados heterogêneo e de tamanho expressivo, podem se tornar inviáveis por meio de métodos tradicionais. No contexto da revolução digital, tecnologias emergentes se mostram mais adequadas para a gestão orientada por dados. Essas novas ferramentas podem ser utilizadas, tanto para apresentar diferentes maneiras de resolver problemas clássicos, quanto para orientar a resolução de novas questões.

Sabe-se, agora, muito mais sobre os processos perceptivos, que projetam o mapa da teia urbana na mente humana. [Eles] são muito parecidos, e consistem em redes conectivas interativas, em [diversos] níveis. Uma ideia, ou um caminho, é estabelecido pela ligação dos tramos mais próximos da rede. A necessidade de [se] ter muitos caminhos alternativos, e [a possibilidade de] compará-los, é a chave do pensamento racional. Pode-se ser forçado a um único caminho por um planejador, mas essa não é a maneira como nossa mente funciona [...]. A busca pela inteligência artificial nas máquinas corresponde, precisamente, à tentativa de ir da simplicidade sem sentido, à complexidade organizada (SALINGAROS, 1998, p. 11).

Entre os recursos computacionais utilizados para a extração de informações e para o acesso ao conhecimento, a partir de dados, estão cada vez mais acessíveis, o que é possibilitado pelas técnicas de aprendizado de máquinas – ou *machine learning*. De acordo com Nilsson (2010), trata-se de um subconjunto da Inteligência Artificial (IA), que desenvolve algoritmos dinâmicos, capazes de decisões baseadas em dados. Essa capacidade é decorrente, principalmente, da forma como algoritmo é desenvolvido: em contraste com os modelos

⁶ *Data-driven approach*. A abordagem é aplicada em diversas áreas do conhecimento, particularmente em projetos, sejam de arquitetura, interiores, produtos, e, mesmo, daqueles associados a aspectos visuais, estratégias de mercado, entre outros.

tradicionais, que seguem instruções de programação estáticas, os algoritmos de aprendizado de máquinas se baseiam no reconhecimento de padrões.

Essas técnicas são comprovadamente aplicáveis para os casos em que o modelo determinístico do sistema é computacionalmente caro, ou, mesmo, quando não há modelo determinístico para resolver o problema. Recentemente, as técnicas de aprendizado de máquinas encontraram aplicações na astronomia, nas geociências e no sensoriamento remoto – nessas áreas, essa versatilidade da ferramenta levou à sua adoção, de forma expressiva, inclusive em substituição às técnicas estatísticas tradicionais (BOUCHEFRY; SOUZA, 2020).

As técnicas de aprendizado de máquinas podem ser qualificadas como **supervisionadas**, quando o algoritmo classifica os dados com base em uma amostra de treinamento, cujas classificações são conhecidas. Neste caso, é necessário informar ao sistema os atributos de cada dado, na amostra de treinamento sendo considerada. No entanto, é possível construir classificações úteis, também apenas com base nos dados, o que ocorre quando não há informações prévias sobre sua classificação. As técnicas para viabilizar esse tipo de classificação se enquadram na categoria de aprendizado **não supervisionado** (NILSSON, 2010).

Um dos métodos mais populares de aprendizado não supervisionada é a técnica k-médias, ou *k-means*. A técnica consiste em agrupar os dados com características similares, conforme as etapas descritas a seguir e ilustradas na Figura 17:

- a) é definido o número de grupos (k);
- b) no espaço de dados, são incluídos k pontos, em locais aleatórios – esses pontos são identificados como **buscadores de agrupamento**;
- c) são calculadas as distâncias entre os buscadores de agrupamento e a cada um dos pontos, representativos dos dados da amostra;
- d) cada dado é incluído no grupo referente ao buscador de agrupamento mais próximo;
- e) é calculado o centroide de cada grupo;
- f) cada um dos buscadores de agrupamento é movido para o centroide de seu grupo correspondente;
- g) as etapas anteriores são repetidas, até que, na etapa 6, nenhum dos buscadores

de agrupamento precise ser movido.

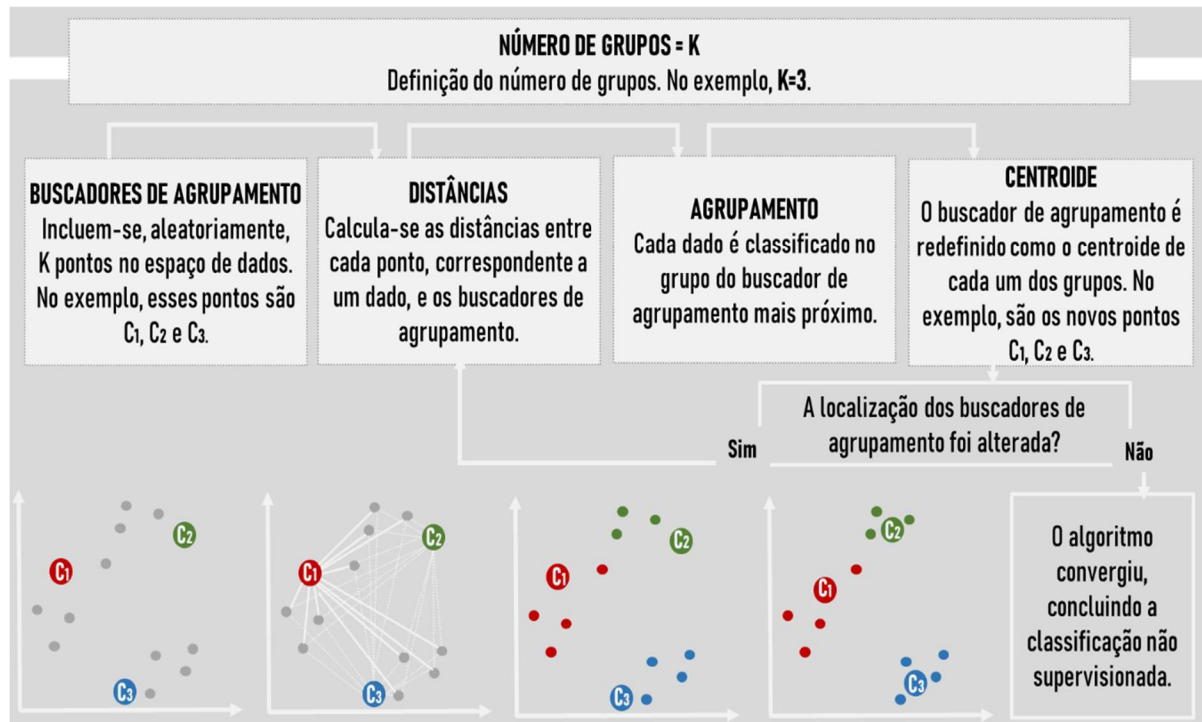


Figura 17: Fluxo ilustrativo da técnica de aprendizado de máquinas *k-means*.

(Elaborado pela autora, com base em Nilsson, 2010)

O fluxo de análise da técnica mostra como o algoritmo agrupa os pontos correspondentes a dados com características similares, identificando padrões que podem não ser identificados em uma análise tradicional. Fica claro, também, o modo dinâmico como funciona a estrutura algorítmica, a partir de uma análise fundamentalmente baseada em dados.

Além de aplicáveis a problemas de clusterização de dados, os algoritmos baseados em inteligência artificial são úteis, também, para a generalização de relações não lineares. Entre os métodos disponíveis para a solução de problemas de ajuste de funções complexas, destaca-se a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA). Inspirado no funcionamento do sistema nervoso biológico, no das RNAs, ao receber um estímulo, elas processam uma função e retornam um valor. Tal funcionamento é descrito a seguir e ilustrado na Figura 18:

- a) os dados de entrada, ao ingressarem na camada de entrada, são associados a pesos;

- b) daí, seguem para a camada oculta onde passam por uma função de ativação, que define a ativação, ou não, de um sinal;
- c) ao saírem da camada oculta, os dados modificados são comparados ao dado alvo, pré-estabelecido para a RNA;
- d) os pesos poderão ser revisados, com base em uma função de perda;
- e) o processo é repetido até que:
 - todos os dados tenham passado pela rede (ciclo denominado de *epoch*) e;
 - os dados de saída estejam suficientemente próximos ao dado alvo.

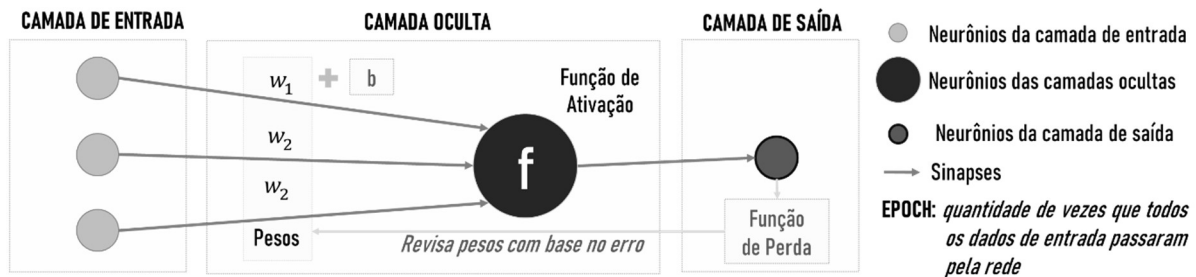


Figura 18: Fluxo ilustrativo de uma Rede Neural.
(Elaborado pela autora, 2022)

Com base na estrutura simplificada apresentada acima, as RNAs podem ser construídas com diferentes arquiteturas, que podem variar, por exemplo, em função da: quantidade de neurônios; quantidade de camadas ocultas; função de ativação; e função perda.

A disponibilidade de ferramentas, que incorporam diversas técnicas de aprendizado de máquinas, tem sido significativamente ampliada. A aplicação dessas ferramentas, em geral, tem sido simplificada, facilitando o seu uso por profissionais que trabalham com a análise de dados e possibilitando sua inclusão nos processos práticos do planejamento urbano. Trata-se de uma tendência importante, justificada, principalmente, pela capacidade, favorecida pela ferramenta, de automatizar e permitir a análise mais aprofundadas dos dados disponíveis.

A utilização de técnicas de aprendizado de máquinas pode constituir um recurso importante para a avaliação dos sistemas urbanos complexos: no contexto das cidades, onde estão disponíveis diversas camadas de informação, é possível obter uma compreensão mais profunda

dos mecanismos, a partir dos quais o meio urbano evolui e se adapta. Os resultados obtidos, por meio da aplicação dessas técnicas, podem revelar, não apenas relações quantificáveis, mas também possibilitam inovações na forma de avaliar o contexto analisado.

Entretanto, é preciso reconhecer que as características, necessidades e recursos de cada cidade serão determinantes no uso dessa tecnologia. As cidades inseridas no contexto dos países em desenvolvimento enfrentam, ainda, problemas elementares. No contexto nacional, conforme Almeida et al. (2007) destacam, as bases de dados municipais são, em geral, caracterizadas pela ausência de dados geográficos, pela dificuldade de acesso aos dados produzidos, ou falta de precisão e confiabilidade da geoinformação, o que pode comprometer a eficácia da análise e da tomada de decisão baseada em dados.

Nessa direção, a discussão sobre a aplicação das tecnologias emergentes disponíveis, para o estudo do ambiente urbano precisa ser intensificada. Almeida et al. (2007) destacam a importância de se considerar as particularidades do planejamento urbano na América Latina, em geral, e no Brasil, em especial, uma vez que elas determinam o modo como essas novas ferramentas serão usadas. É importante que essas decisões sejam conduzidas de forma participativa, atendendo aos reais interesses e necessidades da comunidade local.

A essência da nossa cultura atual, da Sociedade Industrial Moderna, que se encontra na sua fase final de conquista do globo, é a tecnologia. [...]. Regozijamo-nos por estar, finalmente, a democracia tomando conta do mundo. Não nos damos conta de que a verdadeira democracia, a liberdade e a autonomia individual, familiar, local, regional e nacional estão sempre mais corroídas por imposições intransponíveis de necessidades criadas por decisões técnicas, que são tomadas à revelia do cidadão, da comunidade e mesmo dos governos (LUTZENBERGER, 2009, p. 40).

Embora as técnicas de aprendizado de máquinas possam auxiliar ao projetista na sistematização de uma quantidade expressiva de dados, a sensibilidade humana, assim como a sua capacidade de melhor caracterizar um problema e de interpretar resultados, não pode ser substituída. Entende-se, pois, que utilizar uma ferramenta, sem a compreensão do porquê utilizá-la, ou sem um entendimento teórico mais aprofundado sobre sua forma e função, não trará resultados que possam subsidiar a decisão mais acertada.

Por outro lado, a utilização de ferramentas, como a da análise multivariada *k-means*, poderá potencializar uma melhor percepção e interpretação dos problemas, uma vez que permite a sintetização de uma quantidade de informações que, usualmente, ultrapassa a capacidade humana de administrar dados. A tecnologia deve ser colocada à serviço da sociedade, como

uma ferramenta auxiliar na compreensão de seus principais problemas, e não com o papel de definir soluções desvinculadas dos processos sociais e políticos.

Entre as ideias fundamentais para a modelagem dos sistemas urbanos complexo, Pesci e Menegat (2014) destacam, justamente, a necessidade de legitimação do projetista, diante da comunidade à qual se destina o projeto. Outro ponto é a legitimação do projeto em si, que precisa considerar o fator “tempo”, fundamental no tratamento de questões dinâmicas. Essa perspectiva é colocada como uma alternativa às análises baseadas em ciclos de diagnóstico-análise, que, em geral, não são suficientemente flexíveis para incorporar a complexidade aos projetos.

O dinamismo necessário para analisar os sistemas complexos é outro ponto ao qual estão alinhadas as técnicas de aprendizado de máquinas. Diferentemente da estrutura algorítmica tradicional, comumente aplicada aos diagnósticos, os algoritmos de aprendizado de máquina estão estruturados para identificar padrões, com base em dados. À medida que o sistema se modifica, novos padrões podem ser reconhecidos, o que pode fornecer indicadores atualizados sobre o comportamento do sistema, aplicáveis no seu direcionamento à sustentabilidade.

Conforme apresentado por Christofolletti (1999), as visões reducionista e holística são, ambas, necessárias às análises em todas as disciplinas científicas, sendo abordagens complementares: enquanto a visão reducionista irá focalizar os elementos individuais, de cada nível do sistema, a visão holística será orientada de modo a garantir uma visão da totalidade do sistema, que considera a complexidade que o caracteriza.

As aplicações práticas dessas ideias são variadas, como: na modelagem e avaliação de alternativas de planejamento urbano (CHRYSOULAKISA et al., 2013); na caracterização dos fluxos de materiais e energia, na avaliação da sustentabilidade de municípios (KUHN, 2014); na identificação de processos de ocupação de espaços, resultantes de mudanças no uso e ocupação do solo, que contribuam para as emissões de carbono (XIA *et al.*, 2019); na avaliação da sustentabilidade geral das cidades, por meio de modelos que simulem o uso residencial de energia (MOSTAFAVI et al., 2017); e na quantificação da resiliência urbana, sob a perspectiva do metabolismo energético (KUZNECOVA et al., 2014).

Entretanto, a aplicação desses novos conhecimentos, em um formato facilmente compreensível pelos usuários finais, como planejadores urbanos, arquitetos e engenheiros, é limitada. É evidenciada a necessidade de sistematização da análise multicritério, por meio de práticas

reproduzíveis, que contribuam para a melhor compreensão das potencialidades associadas ao emprego da teoria da complexidade e dos sistemas complexos.

3.2.2 Geotecnologias e o estudo de sistemas urbanos

Os fenômenos urbanos podem ser caracterizados no tempo e no espaço. Em sua obra *The Timeless Way of Building*⁷, Alexander (1979) ressalta que os padrões de ocorrência desses eventos estão sempre interligados com um certo padrão geométrico no espaço. O autor considera que cada cidade é constituída de padrões: “eles são os átomos e as moléculas das quais uma cidade é feita”. O padrão espacial passa a ser entendido, desta forma, como um pré-requisito necessário para que o padrão de eventos aconteça, identificando e justificando as particularidades de cada cidade.

Foucault (2013) aponta para a importância da componente espacial para o entendimento dos sistemas humanos. O autor refere que o problema da alocação se apresenta em termos demográficos, não apenas como uma questão de saber se haverá espaço suficiente para o homem no mundo – problema que é, afinal, de máxima importância; mas que está relacionado, também, com o conhecimento das relações de vizinhança, do tipo de armazenamento, de circulação, de identificação, de classificação de quais elementos humanos que devem ser preferencialmente considerados. Segundo o autor: “estamos em uma época em que o espaço se apresenta a nós sob a forma de relações entre alocações” (FOUCAULT, 2013, p. 114).

A teia urbana, definida por Salingaros (1998) como a estrutura complexa que ocorre nos espaços urbanos, pode ser entendida como uma rede de relações, em que os elementos do desenho urbano podem ser de três tipos: os naturais; os nós de atividades humanas; e os elementos arquitetônicos. A partir do tipo de conexão desses elementos é que se estabelecem as fontes de vivacidade urbana, as quais poderão ser, dessa forma, favorecidas no desenho da cidade.

⁷ Primeiro volume da trilogia, em que o autor descreve uma nova forma de planejamento, constituindo uma referência relevante, alternativa às ideias vigentes sobre arquitetura, edificações e planejamento.

Essa correlação espacial já é classicamente expressa como a primeira lei da geografia, conhecida como a Lei de Tobler⁸, segundo a qual os elementos mais próximos são melhor relacionados. Jiang (2019) desenvolve a discussão da vivacidade urbana, nesse contexto, destacando suas duas leis fundamentais da estrutura viva: a Lei da Escala e a Lei de Tobler – que também estão subjacentes às 15 propriedades discutidas na seção 3.1.2. Em essência, a Lei de Tobler é complementar à Lei da Escala, indicando que, em cada escala, os centros são "mais ou menos semelhantes".

É possível descrever numericamente a Lei de Tobler, com base em índices de autocorrelação espacial, que caracterizam, em termos numéricos, a maneira como elementos mais próximos geograficamente podem ser identificados como mais semelhantes. Essa relação, denominada de autocorrelação espacial, pode ser importante na compreensão de fenômenos urbanos reais. Há, entretanto, uma limitação quanto ao uso da estatística clássica, em análises deste tipo de dado, uma vez que grande parte dos métodos assumem a independência dos dados analisados. Instrumentos que considerem essas particularidades dos fenômenos espaciais, característicos das cidades, podem, então, auxiliar na busca por um melhor entendimento de sua realidade.

A análise espacial permite, de uma forma eficiente, quantificar a variabilidade espacial dos fenômenos em estudo. Conforme destaca Câmara (2004), para além da constatação da primeira lei da geografia, é preciso modelar como se distribuem as relações entre os dados, o que é possível por meio das técnicas de estatística espacial. Essa modelagem confere aos estudos urbanos maior confiabilidade e um entendimento mais aprofundado relativamente a problemas de gestão dos recursos naturais e socioeconômicos.

Estando já bem consolidada, no entendimento das cidades, a análise espacial ganha uma nova perspectiva, diante de um novo contexto: não apenas a geoestatística, mas, também, noções, como a de *big data* e de ferramentas associadas à inteligência artificial, possibilitam novas maneiras de estudar o ambiente urbano e de identificar, mais efetivamente, os problemas e aptidões de cada local.

Ao incorporar à análise as geotecnologias e dados georreferenciados, referentes às dinâmicas municipais, é possível, não apenas uma melhor visualização da realidade local, mas, também, a geração de metodologias de integração mais adequadas, que possibilitem a implantação, em

⁸ "No mundo, todas as coisas se parecem, mas coisas mais próximas são mais parecidas entre si que aquelas mais distantes".

cada cidade, de documentos regulatórios, tal qual o Estatuto da Cidade, de modo a direcioná-las de modo tal a constituírem cidades mais sustentáveis (ALMEIDA et al., 2007).

Nesse sentido, reconhecer as múltiplas dimensões e dinâmicas da cidade vai além da sua representação computacional. Processamentos quantitativos, sobre uma base espacial, possibilitam revelar características e processos intrínsecos aos fenômenos em análise, traduzindo a complexidade inerente à esfera urbana, para uma linguagem em meio digital. Essa é uma tendência que vem sendo disseminada, com a representação das realidades em meio digital, por meio, principalmente, dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que possibilitam armazenar, analisar, visualizar e compartilhar informações sobre a cidade (ALMEIDA et al., 2007).

Espera-se que a integração de informações em um SIG possa vir a facilitar a tomada de decisões que direcionem as cidades para uma condição de maior sustentabilidade, uma vez que possibilita a análise integrada de vários aspectos. Chrysoulakisa et al. (2013) destacam a relevância dos SIG e dos sistemas de observação do planeta Terra, no tocante à obtenção de parâmetros fundamentais relativos à modelagem de variáveis associadas ao metabolismo urbano. As aplicações, nesse contexto, incluem: a avaliação do planejamento e gerenciamento urbano sustentável; trocas radiativas; características da superfície; quantificação dos fluxos de calor na superfície; caracterização da ilha de calor urbana e de ondas de calor; precipitação; e qualidade do ar.

A geração massiva de dados, em diversas escalas, tem contribuído para a ampliação das aplicações dos SIG. Entre esses dados estão incluídos, desde microinformações, obtidas em tempo real e geolocalizadas por GPS, até informações sobre grandes áreas, obtidas por drones e satélites. No contexto do estudo de grandes áreas, vale destacar a tecnologia de obtenção de dados por sensoriamento remoto. A técnica, já amplamente utilizada na identificação de padrões e tendências, quanto ao uso e ocupação do solo, consiste na obtenção de dados por sensores instalados em plataformas de aeronaves e espaçonaves.

As imagens aéreas e de satélite tem o potencial de ampliar a percepção da paisagem, adicionando detalhes ao universo de informações e possibilitando o reconhecimento de padrões. O SIG e o Sensoriamento Remoto são importantes ferramentas holísticas, que possibilitam a análise, planejamento e gestão de paisagem, como apoio a projetos cada vez mais complexos. Os dados obtidos por Sensoriamento Remoto podem ser, por meio de um SIG, relacionados

entre si e com outros conjuntos de dados, possibilitando a transformação de informações brutas em informações úteis e politicamente aplicáveis (LANG; BLASCHKE, 2009).

Um sistema de sensoriamento remoto é composto, basicamente, pela fonte de energia, pelo alvo ou objeto sensoriado, pelo caminho de transmissão e pelo sensor. Quando expostos a uma determinada fonte de energia, os materiais que compõem a superfície terrestre refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética, de variados comprimentos de onda, e que estão associados às suas propriedades biofísicas e químicas. A relação entre a radiação eletromagnética captada pelo sensor e as características da cobertura do solo permite a análise de informações importantes sobre o ambiente natural e construído.

As particularidades do sistema de aquisição de dados, por sensoriamento remoto, influenciam nas características dos dados obtidos. Os principais fatores influenciando tais características estão esquematicamente apresentados na Figura 19.

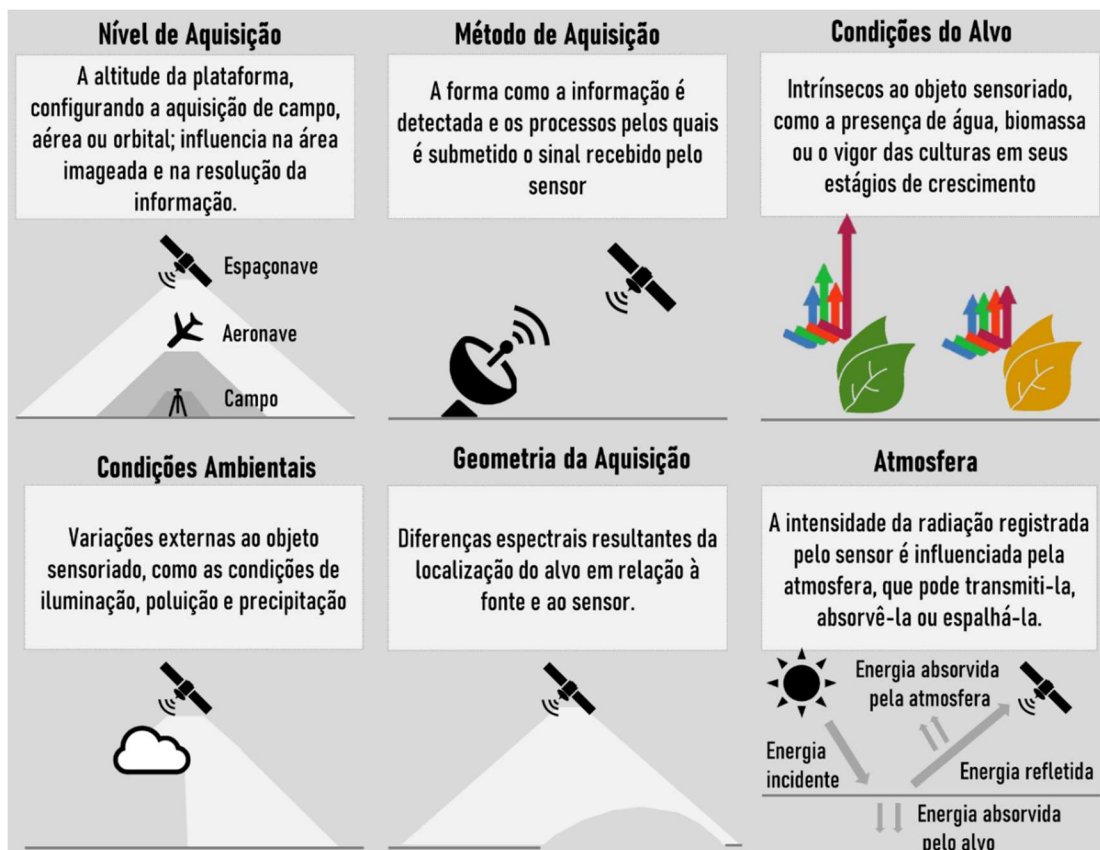


Figura 19: Fatores influenciando os dados obtidos por sensoriamento remoto.

(Elaborado pela autora, com base em Florenzano, 2013)

A utilização de satélites artificiais para obtenção de informações remonta à década de 1950, com o lançamento do satélite Sputnik, pela antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas, e, mais tarde, com o lançamento do satélite Explorer-1, pelos Estados Unidos. Atualmente, diversas plataformas orbitais estão em operação, enviando informações sobre recursos terrestres.

Presentemente, um dos sistemas orbitais mais populares e de ampla utilização é o Landsat, desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). A série de nove satélites lançados teve início com o lançamento do Landsat-1, em 1972. Essa série de satélites pode ser considerada a principal, no campo do sensoriamento remoto, não apenas por suprir dados de forma contínua, e pelo longo período de fornecimento de dados dessa natureza, mas também pela sua notável facilidade de acesso e pela qualidade dos dados disponibilizados.

Os satélites Landsat-4, 5 e 6 possuem dois sistemas de sensores: o *Multispectral Scanner System* (MSS) e o *Thematic Mapper* (TM), com sete canais, sendo: três no espectro do visível; um, no do infravermelho próximo; dois, no do infravermelho médio; e um, no do infravermelho termal. Sua resolução espacial é de 120 m, para o canal termal, e 30 m, para os demais. O Landsat-6 foi considerado perdido após seu lançamento, visto que não chegou a entrar em órbita. A novidade do Landsat-7 foi a substituição do sensor TM, pelo *Enhanced Thematic Mapper, Plus* (ETM⁺), que inclui o canal pancromático, com resoluções espaciais de 15 metros e de 60 metros. Em 2013, foi lançado o Landsat-8, cujos sistemas sensoriais são o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Como novidades, foram adicionadas ao OLI: uma banda do azul profundo, para estudos costeiros e de aerossol; uma faixa do infravermelho de ondas; e uma banda para avaliação da qualidade, que fornece informações sobre a presença de nuvens, água e neve. Em relação ao TIRS, foram adicionadas duas bandas térmicas⁹.

No contexto brasileiro, destaca-se o Programa CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*, Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), resultado da parceria entre China e Brasil para o desenvolvimento de satélites de observação da Terra. O CBERS-1, primeiro satélite da série, foi lançado em 1988. Deste então, o programa tem continuado e evoluído em sua tecnologia, resultando em melhorias geométricas e espectrais das imagens obtidas. O mais recente dos seis

⁹ As informações técnicas sobre os satélites da série Landsat são disponibilizadas, pela NASA, no site do programa, disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>. Acesso em 10 jan. 2023.

satélites da série é o CBERS 4A, colocado em órbita em 2019. A órbita do satélite conclui um ciclo a cada 31 dias. Uma das principais novidades do satélite é sua câmera WPM, que permite a aquisição de imagens com resolução espacial panorâmica, de 2 m, e multiespectral, de 8 m¹⁰. Tal característica é um elemento importante para a aplicação dos dados obtidos pelo sensor em estudos na escala intraurbana.

Inicialmente, o alto custo associado à aquisição das imagens de satélites limitou sua aplicação ampla a fins científicos e práticos. Foi o acesso aberto às imagens proporcionadas por alguns dos principais satélites, que possibilitou o desenvolvimento de análises estatísticas e dinâmicas com base nesses dados. Atualmente, tanto os dados obtidos pelos satélites da série Landsat, quanto aqueles obtidos pelo programa CBERS, estão disponíveis gratuitamente.

Diante da necessidade de equipar os planejadores urbanos com ferramentas e metodologias que permitam uma avaliação da dinâmica das cidades, esse acervo de informações históricas e espaciais é apresentado como uma alternativa relevante, para aumentar o conhecimento sobre o ambiente natural e construído, principalmente em áreas que carecem de levantamentos específicos.

O sensoriamento remoto é apresentado, então, como uma ferramenta que permite democratizar o acesso à informação sobre o contexto urbano, e, em particular, ao monitoramento do campo térmico, e sobre o uso e cobertura do solo. Alguns trabalhos vêm apontando a importância do estudo do ambiente construído das pequenas e médias cidades, baseados em informações remotamente adquiridas (AMORIM, 2017; BONAFONI et al., 2017; BUSATO et al., 2014; CARDOSO et al., 2017; MILES e ESAU, 2020; SILVA et al., 2018; YANG et al. 2019).

Este tipo de análise é suficientemente flexível para ser adaptado a municipalidades com realidades e capacidades de investimento distintas. Os resultados provenientes da análise espacial de dados de sensoriamento remoto possibilitam, também, a síntese de diversas variáveis inter-relacionadas, em um mapeamento de fácil compreensão.

O uso de técnicas de análise espacial nos estudos relacionados a exclusão social, também pode ser destacado como um importante passo em direção ao entendimento da dinâmica intraurbana. São destacados diferentes métodos de análise espacial, como: a autocorrelação local; o

¹⁰ As informações técnicas sobre os satélites da série CBERS são disponibilizadas, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, no site do programa, disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br>. Acesso em: 10 jan. 2023

desenvolvimento de índices e indicadores; mapas de autocorrelação espacial, como base para agrupamento espacial, regressão espacial, e análise de superfícies de tendência derivadas de interpolação geoestatística (CÂMARA, 2004).

Abordagem tradicionais a respeito da segregação socioespacial, como o mapa da Exclusão/Inclusão Social, proposto por Sposati (1996), para a cidade de São Paulo, podem ser aprofundadas a partir de novas técnicas de análise espacial, que possibilitam combinar informações de diversas camadas e identificar padrões, com o auxílio da tecnologia de inteligência artificial.

Bettencourt (2015) ressalta, ainda, as novas comunidades tecnológicas, como agentes importantes na construção de bancos de dados dinâmicos e consistentes. O levantamento de informações georreferenciadas, a nível da comunidade, é possível a partir de pesquisas análogas ao censo, baseadas em procedimentos padrões simples e facilmente compartilháveis por meio das novas plataformas online, possibilitando a redução de custos de coordenação. Tais métodos, ainda que relativamente novos, vêm ganhando espaço, apresentando-se como uma alternativa, principalmente em países de renda média, como o Brasil, tanto para localizar os grandes investimentos, quanto no sentido de efetivar melhorias em vizinhanças de baixa renda e habitações de interesse social.

Apesar das vantagens supramencionadas, as barreiras à ampla utilização dos SIG na gestão urbana estão relacionadas, não apenas às questões tecnológicas, mas também à capacitação de recursos humanos e a aspectos culturais. A resistência a projetos que envolvem tecnologia e inovação ainda é, em termos gerais, observável nas agências e instituições responsáveis pela gestão urbana, principalmente nas pequenas e médias municipalidades.

O envolvimento de profissionais do setor é um elemento-chave nesse processo. O esforço conjunto, na estruturação de uma visão estratégica para as cidades, associado ao trabalho transdisciplinar, oportuniza, às equipes de gestão municipal, informações para a tomada de decisão. Esse tipo de avaliação facilita, também, o diálogo e o envolvimento com as comunidades locais, tornando possível a construção de soluções que sejam, ao mesmo tempo, participativas e fundamentadas em evidências científicas.

3.2.3 Metodologias para a avaliação da resiliência urbana

Conforme discutido nas seções anteriores, é possível observar que a abordagem holística das questões urbanas é um aspecto fundamental na busca por cidades mais resilientes: os conceitos de resiliência e a abordagem sistêmica das cidades reservam, desta forma, fortes relações. Entretanto, ainda que, conceitualmente, essas relações possam ser destacadas, são escassas as aplicações práticas que, expressamente, considerem esse arcabouço. Nesse sentido, foi desenvolvida uma ampla revisão de literatura, a fim de verificar a produção acadêmica relativa a aplicações voltadas à resiliência das cidades, nesse contexto.

Na presente investigação, foi realizado um levantamento quantitativo e qualitativo das publicações científicas disponíveis sobre o tema. Foram considerados estudos que incluíssem o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e que tomassem, como elemento integrador, a complexidade dos sistemas urbanos. A plataforma de pesquisa *Science Direct* foi selecionada para a busca, considerando sua ampla abrangência. As buscas foram realizadas na língua inglesa, e as palavras-chave foram escolhidas de maneira a delimitar: i) como elemento integrador, a consideração dos sistemas complexos (*complex systems*); ii) como aplicação, a resiliência urbana (*urban resilience*); e iii) como ferramentas adotadas, as técnicas baseadas em Sistemas de Informações Geográficas (*Geographic Information System – GIS*). Os resultados da busca pelas palavras-chave, são apresentados na Figura 20.

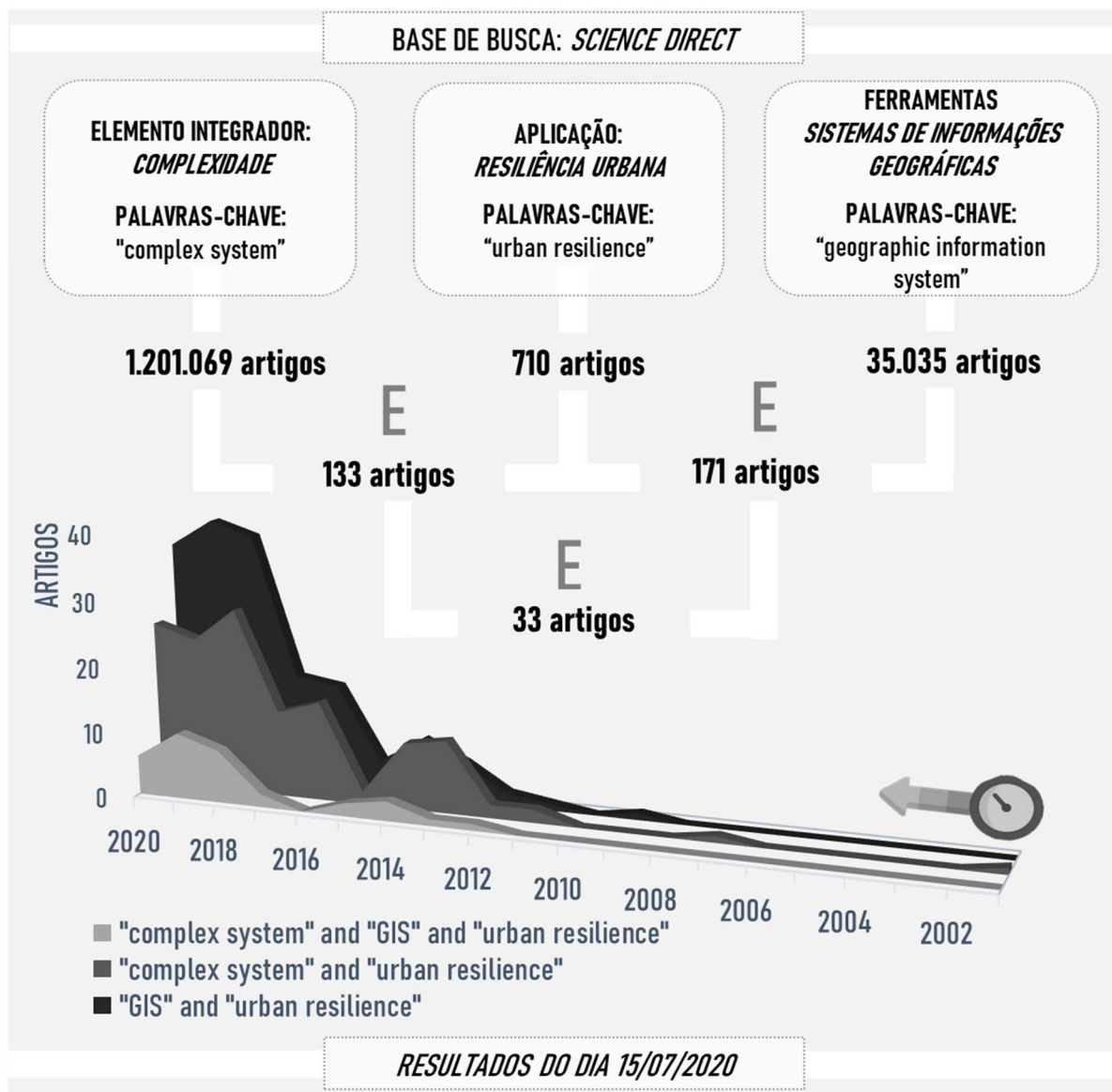


Figura 20: Resultados da revisão sistemática, quanto às palavras-chave utilizadas.

(Elaborada pela autora, 2022)

Observa-se que o estudo dos sistemas complexos se mostra bastante amplo, resultando em 1.201.069 artigos, que incluem a palavra-chave, entre abordagens de diversas áreas e com a publicação de artigos científicos que datam de 1829 a 2021. Os trabalhos que abordam os sistemas complexos em aplicações voltadas à resiliência urbana (resultantes da busca "*complex system*" and "*urban resilience*") se apresentam, não apenas em quantidade significativamente menor, mas também identificam estudos mais recentes: dos 133 artigos resultantes da busca, o mais antigo data do ano de 2001, e 98% deles foram publicados entre 2010 e 2020. Os trabalhos que aplicavam Sistemas de Informações Geográficas (resultado da busca por "*geographic*

information system") somaram 35.035 artigos, publicados entre 1978 e 2021. Desses, apenas 171 faziam referência a aplicações relacionadas à resiliência urbana ("*GIS*" and "*urban resilience*"), sendo que todos com publicação posterior a 2009.

A pesquisa de interesse ("*complex system*" and "*GIS*" and "*urban resilience*"), que incorpora os três elementos abordados no presente trabalho, resultou em 33 artigos, todos publicados a partir do ano de 2011. Como é possível observar no gráfico apresentado na Figura 20, o número de publicações vem aumentando ao longo dos últimos anos, o que é um indicativo da atualidade do tema abordado e da necessidade da ampliação das discussões.

A primeira etapa de seleção dos artigos, foi realizada a partir da leitura dos títulos e resumos dos 33 artigos selecionados. Foram considerados, como critérios de inclusão: i) a abordagem holística, sendo excluídos artigos que tratavam de temáticas específicas; ii) abordagem de temas relevantes ao contexto das cidades brasileiras; iii) trabalhos que referiam uma aplicação ou estudo de caso. Os resultados quantitativos da seleção de artigos, de acordo com os critérios de inclusão, estão apresentados na Figura 21.

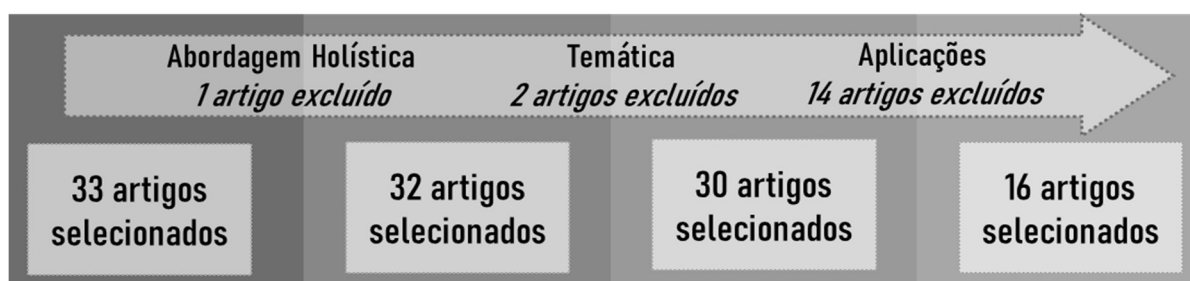


Figura 21: Quantitativo de trabalhos selecionados pelos critérios de inclusão.

(Elaborada pela autora, 2022)

Os 16 artigos selecionados estão apresentados na Figura 22 e foram avaliados de acordo com os seguintes aspectos: i) localização e população da área de estudo; ii) temática central; iii) dados utilizados para realização dos estudos; iv) utilização de ferramentas de aprendizado de máquinas.

Artigo	Título	Autoria e Ano
01	Exploring the coastal urban resilience and transformation of coupled human-environment systems	LI, KAPPAS; LI (2018)
02	Analysis of the interrelationship between houses, trees and damage in a cyclone affected city: Can landscape design and planning utilizing trees minimize cyclone impact?	SOMMEN; PEARSON (2018)
03	Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning	ZARDO et al. (2017)
04	System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China	LI et al. (2020)
05	Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks	SERRE; HEINZLEF (2018)
06	Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: A case study of Talcahuano, Chile	LEÓN; MARCH (2014)
07	Incorporating public transport in a methodology for assessing resilience in urban mobility	GAGNO; NÉLSON; PINTO (2020)
08	Urban resilience at eye level: Spatial analysis of empirically defined experiential landscapes	SAMUELSSON; COLDING; BARTHEL (2019)
09	Resilient transport systems to reduce urban vulnerability to floods in emerging-coastal cities: A case study of Ho Chi Minh City, Vietnam	NHUT; CHAPMAN; TIGHT (2019)
10	A new method to evaluate urban resources environment carrying capacity from the load-and-carrier perspective	SHEN et al. (2020)
11	Strengthening the resilience of urban retailers towards flood risks - A case study in the riverbank region of Kaohsiung City	LING; CHIANG (2018)
12	Enhancing community resilience to urban floods with a network structuring model	XU; ZHONG (2020)
13	System resilience assessment method of urban lifeline system for GIS	HUANG; LING (2018)
14	Policies and governance impact maps of floods on metropolitan Shiraz (the first step toward resilience modeling of the city)	ZARE; TALEBBEYDOKHTI (2018)
15	Valuing green infrastructure in an urban environment under pressure -The Johannesburg case	SCHÄF; SWILLING (2013)
16	Spatial explicit management for the water sustainability of coupled human and natural systems	ZHOU (2019)

Figura 22: Artigos selecionados.
(Elaborada pela autora, 2022)

A abordagem geral, de cada um dos artigos selecionados, é apresentada na Figura 23:

Artigo	Abordagem
01	São quantificados, por quatro modelos, fatores de transformação em sistemas complexos. O modelo de ciclo adaptativo descreve a dinâmica de sistemas humanos e naturais interativos. São consideradas quatro fases contínuas: exploração, conservação, liberação e reorganização.
02	São avaliadas informações históricas, identificando-se o papel da floresta urbana e do posicionamento das habitações na redução dos danos causados por ciclones.
03	É avaliada a capacidade de resfriamento da infraestrutura verde urbana, considerando aspectos relacionados à cobertura de árvores, à cobertura do solo e ao tamanho da estrutura.
04	Um modelo de sistema dinâmico é utilizado na abordagem da resiliência urbana, para esclarecer o <i>feedback</i> causal e o mecanismo de interação dinâmica entre os componentes da resiliência urbana.
05	Sugere novos métodos, para avaliar e mapear níveis de resiliência a inundações, levando em consideração as redes de infraestrutura como propagadoras de risco, em diferentes escalas espaciais.
06	É verificado como a resiliência a eventos de tsunamis pode ser potencializada por mudanças na morfologia urbana, relacionadas às redes viárias. São considerados métodos mistos, como base para as modificações propostas no projeto urbano, visando melhorar a evacuação e o abrigo em espaços públicos.
07	Uma metodologia é proposta para avaliar a resiliência na mobilidade urbana. Observa-se que a resiliência é uma função da mudança modal do carro para os modos ativos e transporte público.
08	É analisada como as relações entre forma urbana e bem-estar estão conectadas, por meio de dados experienciais geolocalizados e de variáveis do ambiente físico.
09	Um modelo de sistema de transporte resiliente é desenvolvido, de modo a considerar a vulnerabilidade a eventos de inundações, fornecendo uma organização espacial flexível de rotas e de nós.
10	É proposto um método para avaliar a capacidade de carga ambiental dos recursos urbanos, de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável, considerando suas dimensões ambiental, econômica e social.
11	Avalia a resiliência a eventos de inundação, por meio da análise da interação homem-ambiente. Os impactos afetam a conscientização, as percepções do clima futuro e os ajustes de adaptação da população impactada.
12	É proposta uma rede de avaliação em quatro níveis de resiliência da comunidade, contribuindo para o entendimento interdisciplinar de sua resiliência às inundações urbanas.
13	É proposta uma estrutura de indicadores de avaliação da resiliência do sistema, de modo a atribuir pesos dinamicamente. Uma plataforma de visualização, baseada em SIG, possibilita simular a resiliência.
14	A resiliência contra inundações é avaliada e modelada, possibilitando verificar, em um mapa único, as políticas e a governança na cidade. Propõe-se uma medida integrada do impacto dessas políticas e da governança, mapeando seu valor no tempo e no espaço.
15	Apresenta uma estrutura de planejamento para a infraestrutura verde, considerando os ativos ecológicos como infraestrutura.
16	Avalia as mudanças dinâmicas na evolução urbana, que envolvem a relação entre a ação antrópica e os recursos hídricos, avaliando as relações espaciais da sustentabilidade da relação homem-água.

Figura 23: Abordagem dos artigos selecionados.
(Elaborada pela autora, 2022)

Os países onde estão localizadas as áreas de estudo dos artigos avaliados estão destacados na Figura 24. É possível observar que as aplicações ocorrem em contextos bastante diversos, que

incluem países desenvolvidos e em desenvolvimento. Dos 16 artigos selecionados, 38% identificam aplicações em megacidades chinesas (HUANG; LING, 2018; LI et al., 2020; LI et al., 2018; SHEN et al., 2020; XU; ZHONG, 2020; ZHOU, 2019). Apenas dois dos artigos abordam estudos de caso em cidades latino-americanas (GAGNO et al., 2020; LEÓN e MARCH, 2014). Todos os artigos referem estudos de caso de cidades com mais de 100.000 habitantes. Merece destaque, entretanto, o artigo de Serre e Heinzlef (2018), no qual, além da cidade alemã de Hamburgo (1.899.000 hab), é estudada a cidade francesa de Avignon (92.130 hab). Observa-se, também, que não foi encontrado nenhum estudo focado na resiliência urbana de pequenas municipalidades

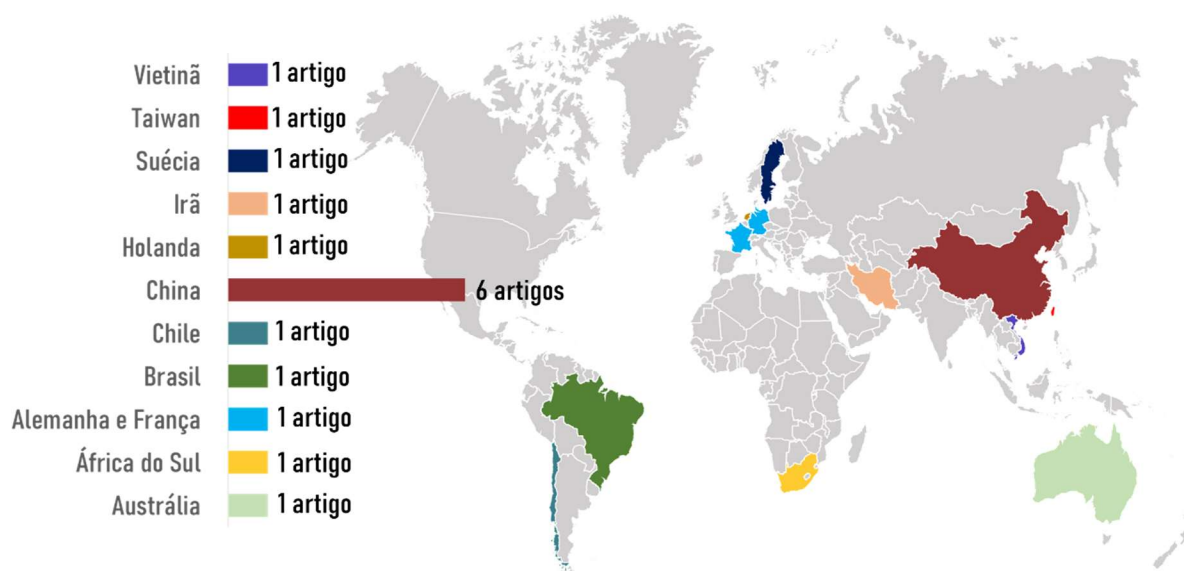


Figura 24: Localização das áreas de estudos, nos artigos selecionados.
(Elaborada pela autora, 2022)

Quando avaliada a temática central, destacam-se os estudos que abordam a resiliência de comunidades a eventos de cheia, presentes em 5 dos artigos selecionados (LING e CHIANG, 2018; NHUT et al., 2019; SERRE e HEINZLEF, 2018; XU e ZHONG, 2020; ZARE e TALEBBEYDOKHTI, 2018). Outros 3 artigos dão destaque à importância da infraestrutura verde, em função da importância da paisagem no contexto urbano, particularmente no que se refere à sua contribuição para a sustentabilidade das comunidades urbanas, em termos de serviços ecossistêmicos que sustentam a vida, como o fornecimento local de alimentos. A infraestrutura verde também é destacada, enquanto contribuinte para a atenuação de danos provocados por ciclones (SOMMEN e PEARSON, 2018); por sua contribuição no

abrandamento das ilhas de calor urbano nas cidades (ZARDO et al., 2017); e enquanto elemento essencial no planejamento de cidades em crescente e acelerado níveis de urbanização (SCHÄF e SWILLING, 2013).

Quanto aos dados necessários para o desenvolvimento das análises, observou-se que em todos os trabalhos foram utilizados dados específicos, sejam eles decorrentes de levantamentos realizados por equipes de pesquisa ou por autoridades locais. Em 38% dos estudos, foi identificada a realização de entrevistas com as comunidades objeto de tais estudos, bem como consultas a especialistas (HUANG e LING, 2018; LING e CHIANG, 2018; SAMUELSSON et al., 2019; SCHÄF e SWILLING, 2013; XU e ZHONG, 2020). Neste particular, cabe destacar o estudo de Samuelsson et al. (2019), relatando consulta à comunidade local, por meio de um Sistema de Informações Geográficas participativo, de fácil compreensão, possível de ser acessado com a utilização de computadores domésticos e dispositivos portáteis, tendo resultado na produção de uma grande amostra de experiências geocodificadas, com relação a muitos aspectos associados à vida da cidade.

Outra fonte de dados utilizada nos estudos realizados foram os censos populacionais e os levantamentos estatísticos, realizados por autoridades locais (LI et al., 2018; LING e CHIANG, 2018; SERRE e HEINZLEF, 2018). Os dados levantados em cada estudo possibilitam uma diversidade de análises, sob diversas óticas, inclusive nas escalas espacial e temporal.

Zardo et al. (2017), explorando as potencialidades de dados obtidos remotamente, via satélite, utilizam informações de sensoriamento remoto para identificar a contribuição dos diferentes componentes de uma infraestrutura verde, no tocante ao abrandamento das condições térmicas do ambiente urbano.

O uso de ferramentas de aprendizado de máquinas é identificado em apenas 3 dos trabalhos analisados: Li et al. (2018), que classificaram, em graus de resiliência, os resultados de um modelo de ciclo adaptativo, que descreve a dinâmica de sistemas naturais e humanos, por meio da técnica de clusterização *k-means*; Samuelsson et al. (2019), que utilizaram o modelo de mistura de gaussianas (Gaussian Mixture Model - GMM¹¹), para identificar tipologias experienciais da paisagem, com base na diversidade e conectividade das experiências

¹¹ O método de agrupamento *k-means* é um caso especial de GMM, onde a covariância é assumida como 0. No caso específico do trabalho mencionado, o GMM foi escolhido, pois a covariância entre algumas categorias de experiência foi assim identificada.

levantadas; e Huang e Ling (2018), que também utilizaram a técnica de clusterização *k-means*, associada a um algoritmo híbrido, para identificar e classificar o nível de resiliência de diferentes regiões.

Com base nos resultados, é possível observar que a abordagem da resiliência das cidades, consideradas como sistemas complexos, é bastante atual e tem recebido crescente atenção ao longo dos últimos anos. Foi verificada, no entanto, uma lacuna em relação ao estudo de pequenas municipalidades, nesse contexto. Observa-se, também, o potencial disponível para que se amplie a utilização de dados de sensoriamento remoto e de técnicas de aprendizado de máquinas, para o aprofundamento da análise geoespacial e de um amplo leque de outros estudos que possam se valer de dados disponíveis gratuitamente.

3.2.4 Considerações sobre as ferramentas para análise dos sistemas urbanos

Reconhecendo o espaço urbano como uma estrutura viva, essencialmente baseada nas interações entre muitos agentes localizados, e em movimento, no espaço e no tempo, foi apresentada, na seção 3.2, uma discussão de como a abordagem orientada por dados, associada a tecnologias emergentes, pode contribuir para a análise holística das cidades.

Novos modelos dinâmicos para o desenvolvimento da cidade, baseados na evolução e estrutura das redes urbanas, permitem entender melhor suas problemáticas. Muitas das teorias urbanas podem ser melhor compreendidas, sob a perspectiva de redes complexas: as cidades em rede, em geral suportam a hierarquia de escala, ou a estrutura viva (JIANG, 2015b; JIANG; YAO, 2010).

Bancos de dados georreferenciados, com características de *Big Data*, fornecem um novo instrumento para a pesquisa geoespacial. Ainda que, em geral, esses dados sejam considerados como não estruturados, é destacada a sua adequação, quando aplicados às estruturas vivas. Isso ocorre porque o próprio espaço é inerentemente bem estruturado. Embora esses bancos de dados possam ser considerados únicos e importantes, para desenvolver novos *insights* sobre formas e processos geográficos, existem enormes desafios associados à sua representação, estruturação e análise. Estruturas convencionais, estatísticas gaussianas e a geometria euclidiana se apresentam limitadas nesse tipo de análise (JIANG; REN, 2019).

Nesse contexto, as técnicas de aprendizado de máquinas, de análise espacial multivariada e de geostatística, são apresentadas como ferramentas emergentes e adequadas para a condução de uma gestão urbana baseada em informações (HUANG; LING, 2018; LI et al., 2018; SAMUELSSON et al., 2019). Além de possibilitar automatizar processos, a fim de revelar e de quantificar padrões de múltiplas variáveis, os resultados obtidos da análise, por meio dessas ferramentas, favorecem, também, a comunicação com as comunidades locais, possibilitando a apresentação de um diagnóstico claro e de fácil entendimento. Essa é uma etapa fundamental na abordagem de problemas de complexidade organizada.

Fica evidenciada a crescente importância do domínio de ferramentas adequadas para analisar dados e informações, como suporte às ações de governança, no direcionamento das cidades à sustentabilidade e no fortalecimento de sua resiliência. As cidades com acesso a maiores recursos estão, progressivamente, adaptando-se a essa nova realidade, merecendo destaque os massivos investimentos das principais *Smart Cities*, p.e., Singapura, Zurich e Oslo¹². Entretanto, capacitar também as cidades de menor porte, e com menor acesso a recursos para investimento em levantamentos locais, é também uma etapa importante no combate às inequidades, favorecendo uma visão estratégica e acessível, dentro das possibilidades e particularidades de cada município.

Análises baseadas em abordagens integradoras, que levem em consideração a complexidade dos sistemas urbanos, ainda são pontuais, o que pode constituir um obstáculo para a sua incorporação nas políticas de implementação da resiliência urbana. A revisão bibliográfica realizada no presente capítulo permitiu identificar que, embora as pesquisas acerca da **resiliência** dos sistemas urbanos complexos estejam ganhando espaço nas discussões sobre a sustentabilidade, ainda existe um longo caminho a percorrer, no sentido de ampliá-la e disseminá-la, de modo a ser efetivamente incorporada às práticas de planejamento.

O fortalecimento da resiliência das cidades é fundamentado em uma mudança de paradigma, tanto relacionada às mudanças de comportamento, hábitos e meios – propostas pelos movimentos de transição para a sustentabilidade – quanto aos recursos técnicos, que permitem um aprofundamento de análise dos sistemas urbanos complexos. O tratamento de um conjunto de variáveis interrelacionadas, via recursos de projeto habitualmente empregados, considera

¹² As cidades são as primeiras colocadas no ranking das *Smart Cities*, de acordo com o IMD *Smart City Index* 2019. Disponível em: <https://www.imd.org/research-knowledge/reports/imd-smart-city-index-2019/>. Acesso em: 24 ago 2020.

tais conjuntos como sistemas isolados, o que pode fazer com que se tornem inexecutáveis iniciativas verdadeiramente integradoras e transdisciplinares.

Embora diversos desses estudos tenham foco na adaptação às mudanças climáticas, a abordagem multifacetada, que inclua sinergicamente questões sobre os hábitos de consumo, o uso de serviços ecossistêmicos no meio urbano e a implantação de novas tecnologias, tais quais as que possibilitem o reconhecimento de padrões de sustentabilidade, deverá ser ampliada.

A construção da resiliência se torna exequível quando baseada em mudanças operacionalizáveis, que ocorrem em diversos nichos interconectados. Aprimorar seu entendimento requer uma compreensão clara das inter-relações entre os sistemas, podendo assim ser facilitada pela aplicação de novos métodos transdisciplinares (COLLIER et al., 2013; HOPKINS, 2014; LAWRENCE, 2004; PORTUGALI, 2008). Já, a adoção das novas técnicas que venham a ser concebidas nessa direção, que se pressupõe sejam compatíveis com objetivos que permitam avanços em resiliência, requer, em paralelo, um esforço técnico, no sentido de também avançar na criação de novas propostas analíticas.

Adicionalmente, será necessário que os resultados gerados por tais análises, possam ser facilmente acessados e compreendidos pelo público ao qual os benefícios gerados sejam destinados, como, por exemplo, por meio de representações cognitivas e desenhos de cenários. Ainda, e em paralelo, deve-se ter presente que a construção do saber relativo à resiliência urbana e às suas dimensões, requer a sistematização e contínua disseminação do conhecimento resultante das análises realizadas. Somente assim se tornará possível a sua real assimilação pelos diversos atores participando deste processo, incluindo: comunidades; tomadores de decisão; agentes intervenientes nos processos urbanos e de todos aqueles que possam ter influência nos fenômenos que neles venham a ocorrer.

Metodologicamente, ainda que tenham sido identificados estudos direcionados à avaliação de resiliência dos sistemas urbanos complexos, não foi possível identificar um procedimento padrão ou um fluxo metodológico que possa contribuir de modo significativo à compreensão de padrões de sustentabilidade, pelos atores acima identificados.

Já, a opção pela metodologia a ser empregada está intrinsicamente relacionada aos dados disponíveis para cada localidade. Mesmo que a aplicação de métodos emergentes de análise de dados, com foco em padrões espaciais, seja ainda incipiente por parte dos tomadores de decisão,

essas metodologias têm se mostrado suficientemente aptas e flexíveis para o desenvolvimento de estudos específicos e adequados, no sentido de bem representar a dinâmica da realidade.

Uma análise integrada entre os diversos elementos que compõem a cidade é, dessa forma, suscitada, para um melhor entendimento dos sistemas urbanos complexos e para o direcionamento das decisões a um cenário mais sustentável e, por consequência, mais resiliente.

4 ESTUDO DE CASO: O VALE DA FELICIDADE

Um estudo de caso pode ser considerado adequado, quando direcionado à investigação de um fenômeno contemporâneo, em que os limites entre seu contexto real e o fenômeno não sejam claramente percebidos (GIL, 2017). Também no entender de Yin (2001), os propósitos de um estudo de caso incluem a investigação de situações cujos limites não estejam claramente definidos, preservando suas particularidades e descrevendo o contexto da investigação. Isso permite a formulação de hipóteses sobre os fenômenos estudados, conduzindo à explicação das variáveis causais, em situações de variável complexidade.

A proposta do presente trabalho, está alinhada aos objetivos de um estudo de caso, configurando-se como um estudo holístico, centrado em questões urbanas, na escala de uma bacia hidrográfica. A operacionalização desse tipo de análise requer a realização de diversos estudos. Yin (2001) refere que um projeto incorporado possibilita criar um foco para um estudo de caso, evitando, caso as questões relevantes da pesquisa sejam modificadas, que o projeto de pesquisa tenha que ser reiniciado.

Gil (2017) comenta ser difícil realizar generalizações tendo por referência a análise de apenas um único ou de poucos casos. Nessa direção, o estudo proposto não tem o intuito de proporcionar um conhecimento preciso sobre as características da área de estudo, mas sim o de proporcionar uma visão global das questões avaliadas, de forma a tornar este estudo-piloto replicável e adaptável ao estudo de outras pequenas e médias municipalidades brasileiras.

Também devido à dinâmica característica do ambiente urbano, a proposta do presente trabalho é a de associar a visão mais ampla e integradora do sistema, em sua totalidade, ou seja, a visão holística, à incorporação de dados e medidas claras, que possam ser operacionalizadas. Nesta direção é que se desenvolveu a análise multiescalar proposta a seguir, orientada para a realização de uma análise regional de municípios situados ao longo do Vale do Rio Caí, também conhecido regionalmente como o **Vale da Felicidade**.

A área de estudo engloba 19 municípios gaúchos: Alto Feliz, Barão, Bom Princípio, Brochier, Capela de Santana, Feliz, Harmonia, Linha Nova, Maratá, Montenegro, Pareci Novo, Salvador do Sul, São José do Hortêncio, São José do Sul, São Pedro da Serra, São Sebastião do Caí, São Vendelino, Tupandi e Vale Real. A localização geográfica da região a ser estudada pode ser considerada privilegiada, em função de sua proximidade, tanto com a Região Metropolitana de

Porto Alegre, como com a Serra Gaúcha, o que favorece sua integração econômica. A localização dos municípios componentes da região é apresentada na Figura 25.

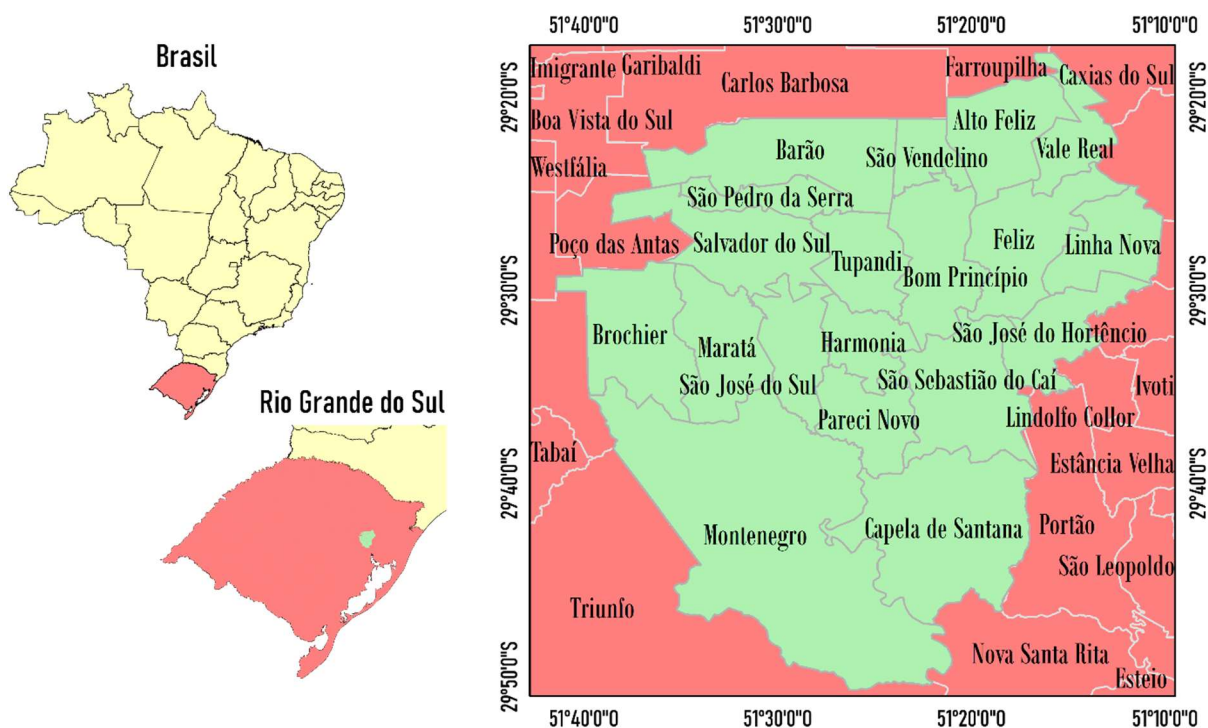


Figura 25: Localização do Vale do Caí (RS).
(Elaborada pela autora, 2022)

Entre os municípios que compõem a área de estudo, encontra-se o município de Feliz (RS), que há mais de uma década, vem sendo objeto de estudos, pelo grupo de pesquisadores da Linha de Pesquisa em Edificações e Comunidades Sustentáveis, do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação – NORIE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os projetos de pesquisa, ensino e extensão do NORIE, buscam abordar, sempre que possível, as questões de sustentabilidade em suas vertentes social, econômica, ecológica, geográfica e cultural, buscando incorporá-las na proposição de soluções, tanto na escala da edificação, quanto na de comunidades (SATTLE, 2007).

O município de Feliz, alcançou destaque em nível nacional por sua classificação em 1º lugar, em 1998, entre todos os municípios brasileiros, em termos do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), e alguns anos mais tarde, em 2012, ter sido avaliado com o 5º melhor índice, também entre todas as municipalidades brasileiras, em avaliação segundo o Indicador Social de

Desenvolvimento dos Municípios (ISDM), um indicador criado pela Fundação Getúlio Vargas, FGV, para servir de parâmetro comparativo do Desenvolvimento Social das Cidades Brasileiras.

Os estudos sendo desenvolvidos com foco na municipalidade de Feliz, dentro da Linha de Pesquisa em Edificações e Comunidades Sustentáveis, têm buscado identificar os fatores determinantes do seu desempenho, assim como propor estratégias voltadas para a sustentabilidade, para outras municipalidades, que, tal como Feliz, enquadrem-se na classificação que identifica municípios de pequeno porte (SILVA *et al.*, 2020).

Tomando como estudo de caso o município de Feliz (RS), Souza (2009) propôs um método de avaliação da sustentabilidade ambiental de pequenos municípios, baseado na Pegada Ecológica, que pudesse ser empregado no processo de elaboração de Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano. Já, Eugênia Kuhn (2014) realizou uma avaliação do metabolismo urbano da municipalidade de Feliz, por meio de uma metodologia funcional, com potencial para ser e replicada em municípios brasileiros com o mesmo perfil. Por sua vez, Desirée Kuhn (2016) realizou uma análise multidimensional dos padrões urbanos do espaço público da área central urbana de Feliz, propondo estratégias para a criação de comunidades mais sustentáveis, associando o pleno desenvolvimento humano, com o equilíbrio ecológico,

Tendo como foco a totalidade territorial da municipalidade de Feliz, Souza (2012) propõe uma abordagem para o planejamento de corredores verdes, que pudesse ser replicada em outros municípios brasileiros de pequeno porte, a partir de dados de domínio público, procedimentos de integração de dados simplificados e resultados de fácil compreensão, em adição à participação de atores locais no processo de planejamento. Moschetta (2013), por sua vez, considera o município de Feliz (RS), como objeto de estudo empírico, no desenvolvimento de sua abordagem para o lançamento de uma paisagem urbana produtiva contínua, adaptada ao contexto do planejamento físico-territorial de municípios brasileiros de pequeno porte. Também focada no tema agricultura urbana, Paim (2017) analisa o potencial de suas contribuições para a segurança alimentar e para o desenvolvimento sustentável das pequenas municipalidades, a partir de um estudo de caso das hortas domésticas no município. No âmbito das políticas urbanas, Andrade (2018) analisa a influência de alguns de seus instrumentos no fomento do desenvolvimento sustentável do município.

Também tomando o município como estudo de caso, Samuel (2011) propõe alternativas de sistemas de tratamento de esgotos sanitários urbanos, visando à melhoria da qualidade dos seus recursos hídricos, com base em estratégias também replicáveis em municípios de pequeno porte. Em área afim, Ercole (2003) concebe um sistema modular de gestão de águas residuárias domiciliares, como uma alternativa mais sustentável para a gestão de resíduos líquidos, agora na escala da edificação, com amplo potencial para ser replicado em municípios com características semelhantes a Feliz.

No presente estudo, cujo foco também compreenderá a municipalidade de Feliz, propõe-se ampliar a abrangência da área de estudo, de modo a incluir a todos os municípios da região do Vale da Felicidade. Além disso, esse recorte possibilitará abranger diversas escalas de análise, incluindo municipalidades com características particulares, sem, entretanto, perder a visão de totalidade da região, de forma integrada. A escolha da área de estudo é, desta forma, baseada em uma delimitação que, inclusive, busca incorporar questões históricas, culturais, administrativas e ambientais.

Instituídos pela Lei Estadual nº 10.283, de 17 de outubro de 1994, os Conselhos Regionais de Desenvolvimento (COREDEs) são definidos como unidades contribuintes para a política de regionalização do Estado do Rio Grande do Sul, tendo por objetivo “a promoção do desenvolvimento regional, harmônico e sustentável, através da integração dos recursos e das ações de governo na região”. As ações desenvolvidas por cada COREDE devem estar direcionadas à melhoria da qualidade de vida da população, à distribuição equitativa da riqueza produzida, ao estímulo à permanência do homem em sua região e à preservação e recuperação do meio ambiente (RIO GRANDE DO SUL, 1994).

A área considerada neste estudo é a delimitada pelo COREDE Vale do Caí. Com uma área total de 1.853 km², seu menor município, em termos de área territorial, é o de São Vendelino, com 32 km², e o maior é Montenegro, com 420 km². De acordo com a estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (BRASIL, 2020a), a população da região era, à época do levantamento, de 191.400 habitantes. Entre os anos de 2002 e 2017, a população residente na região cresceu de 156.065 a 183.888 habitantes, o que representa um crescimento de 24,4%.

Na Figura 26 e na Figura 27, são mostradas imagens de alguns dos municípios que compõem a região do Vale do Caí.



Figura 26: a) Placa indicativa do trajeto, no Vale da Felicidade, no município de Barão; b) centro do município de São Sebastião do Caí; c) centro do município de Harmonia; d) rua no município de Bom Princípio.

(Fotos cedidas por Márcia Stein, 2019).

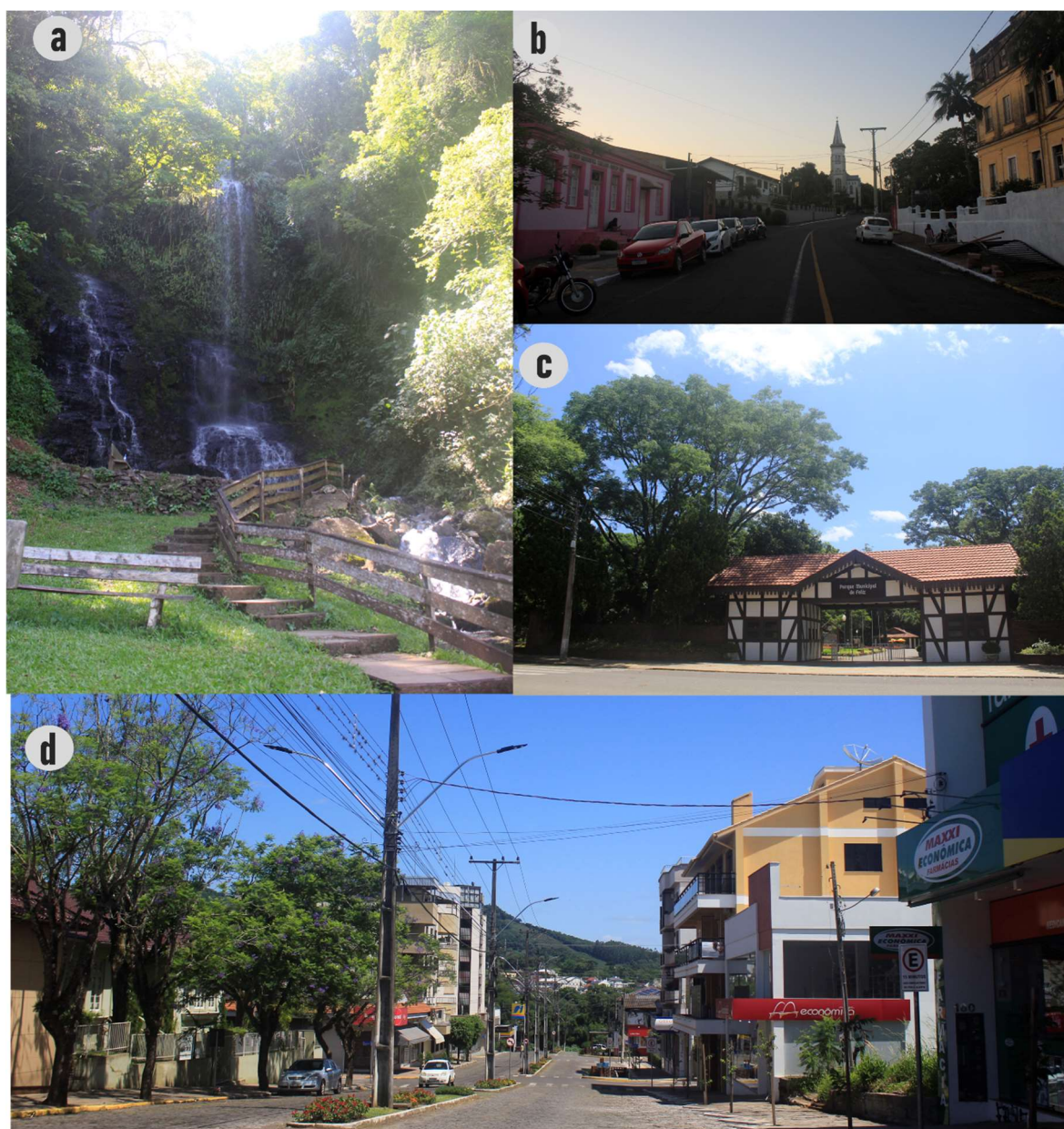


Figura 27: a) Cascata dos Bugres, no município de Alto Feliz; b) centro do município de São Sebastião do Caí; c) Parque Municipal de Feliz; d) centro do município de Feliz. (Fotos cedidas por Márcia Stein, 2019).

O seu PIB, por sua vez, apresentou o significativo aumento de 368,5%, partindo de R\$ 1,49 bilhões, em 2002, e atingindo R\$ 6,97 bilhões, em 2017. O crescimento acentuado do PIB local, superior à taxa de crescimento populacional, pode ser observado, em maior detalhe na Figura 28, na qual é mostrada a distribuição da população, estimada para 2020, por município, bem como a evolução da população, do PIB e do PIB *per capita*, entre os anos de 2002 e 2017, para a região.

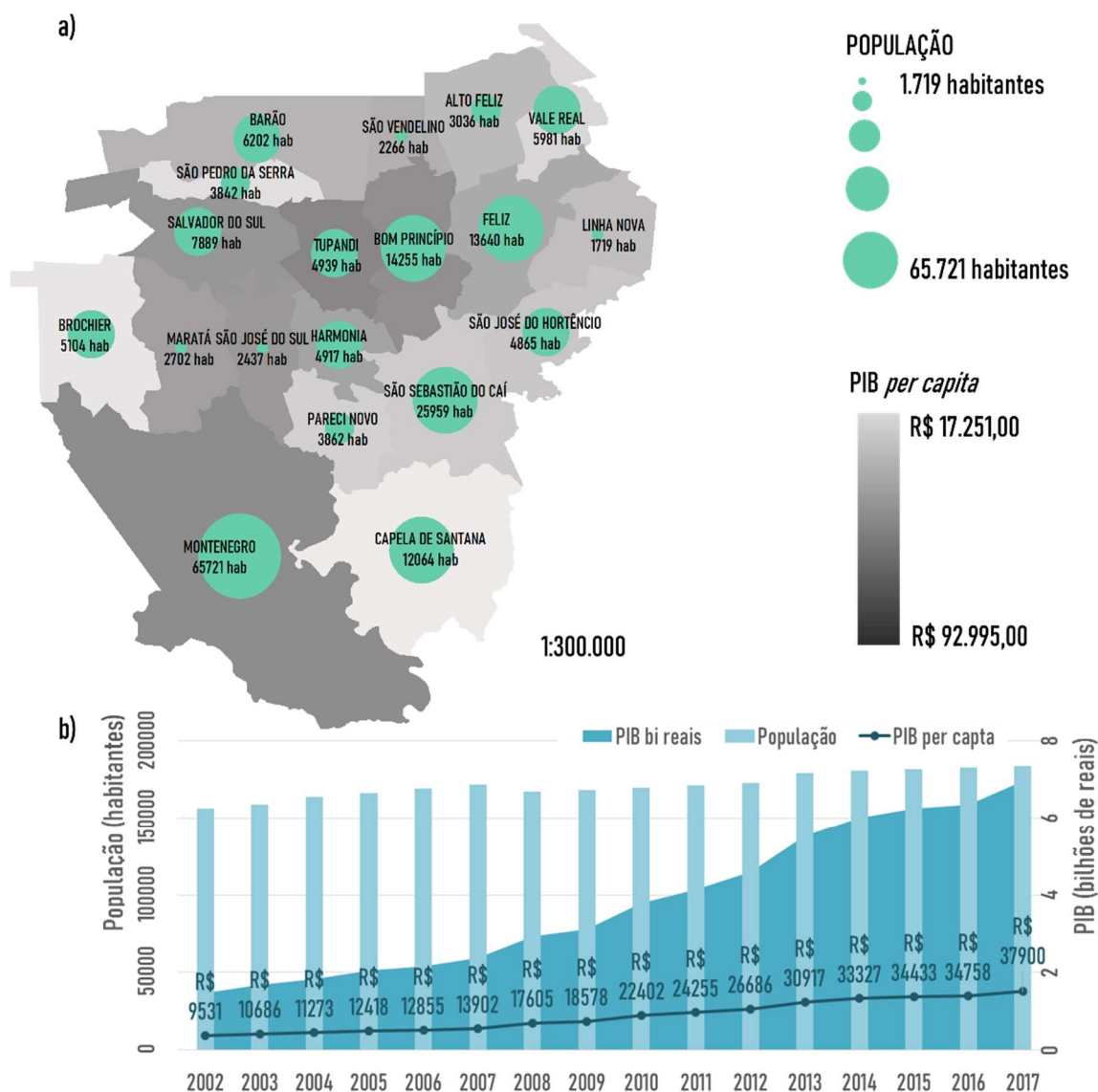


Figura 28: a) Estimativa populacional dos municípios, em 2020 e b) Evolução da população, PIB e PIB *per capita*, entre os anos de 2002 e 2017, na região do Vale da Felicidade.

(Elaborado pela autora, com base em dados do DEE/RS¹³ e BRASIL, 2020a).

No Vale da Felicidade, 7% do Valor Adicionado Bruto (VAB) são referentes ao setor Agropecuário; 35%, à Indústria; e 57%, ao Setor de Serviços. O PIB per capita da região foi calculado, no ano de 2017, em R\$ 37.900,16. O município de Tupandi apresentou o maior PIB per capita, alcançando R\$ 92.994,60, enquanto o município de Capela de Santana apresentou o menor valor da região, com R\$ 17.250,63. Em relação ao PIB per capita dos municípios, entretanto, não foram observadas grandes disparidades, no contexto regional. A distribuição do

¹³ Disponível em <https://dee.rs.gov.br/pib-municipal>. Acesso em: 08 de ago. de 2020.

VAB por setor, dos impostos sobre os produtos, do PIB e PIB per capita, em cada um dos municípios, é mostrada na Figura 29.

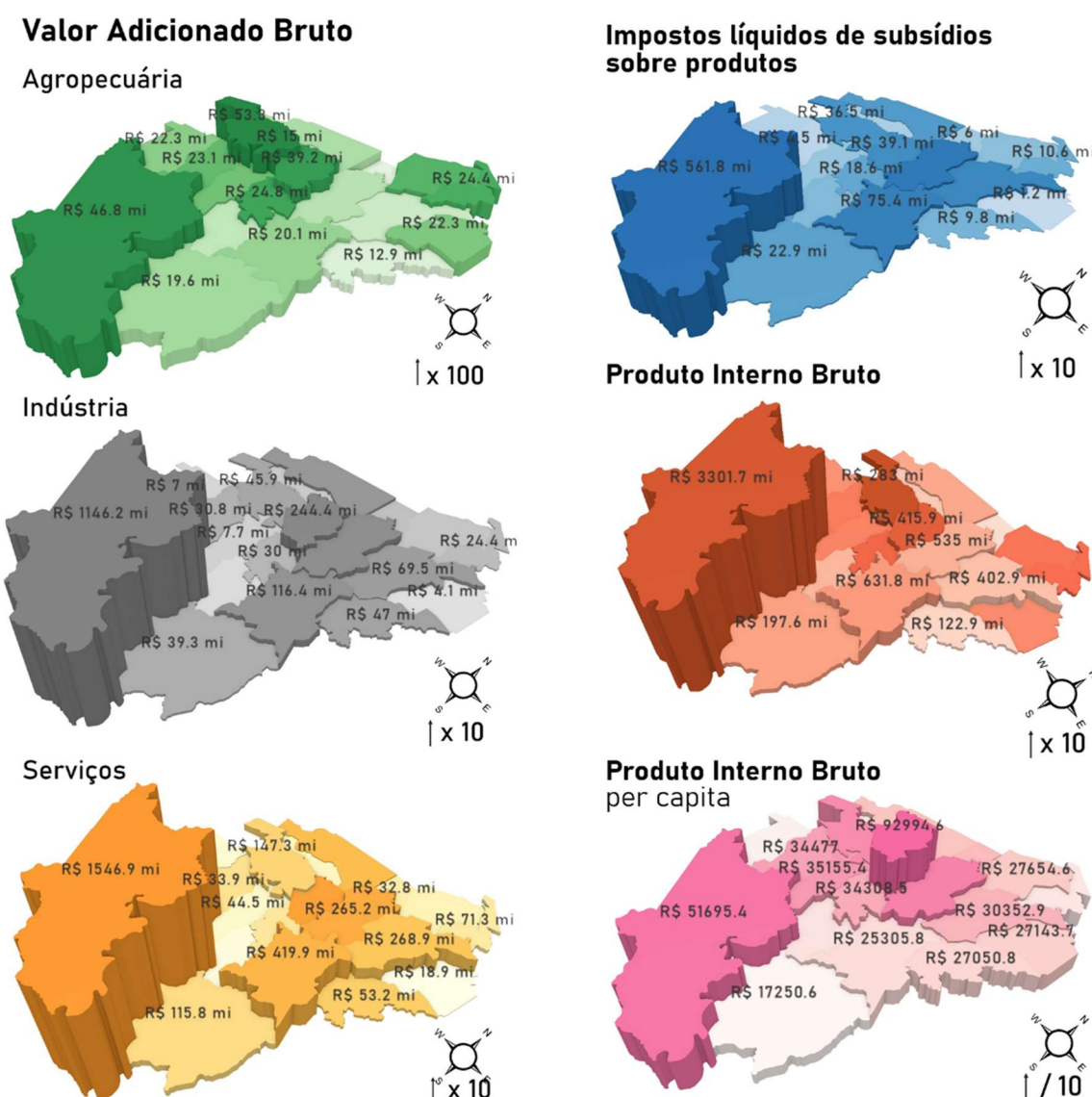


Figura 29: VAB dos setores agropecuário, industrial, de serviços; impostos sobre produtos; PIB e PIB per capita, por município, na região do Vale da Felicidade.
(Elaborado pela autora, com base em dados DEE/RS¹⁴)

Como é possível observar na Figura 30, entre os anos de 1991 e 2019, intensificou-se a predominância da população urbana na região. A população rural total passa de 53.795 habitantes, em 1991, para 51.041 habitantes, em 2019. Já, a população urbana total cresceu, de 73.595 habitantes, em 1991, para 141.699 habitantes, em 2019.

¹⁴ Disponível em <https://dee.rs.gov.br/pib-municipal>. Acesso em: 08 de ago. de 2020.

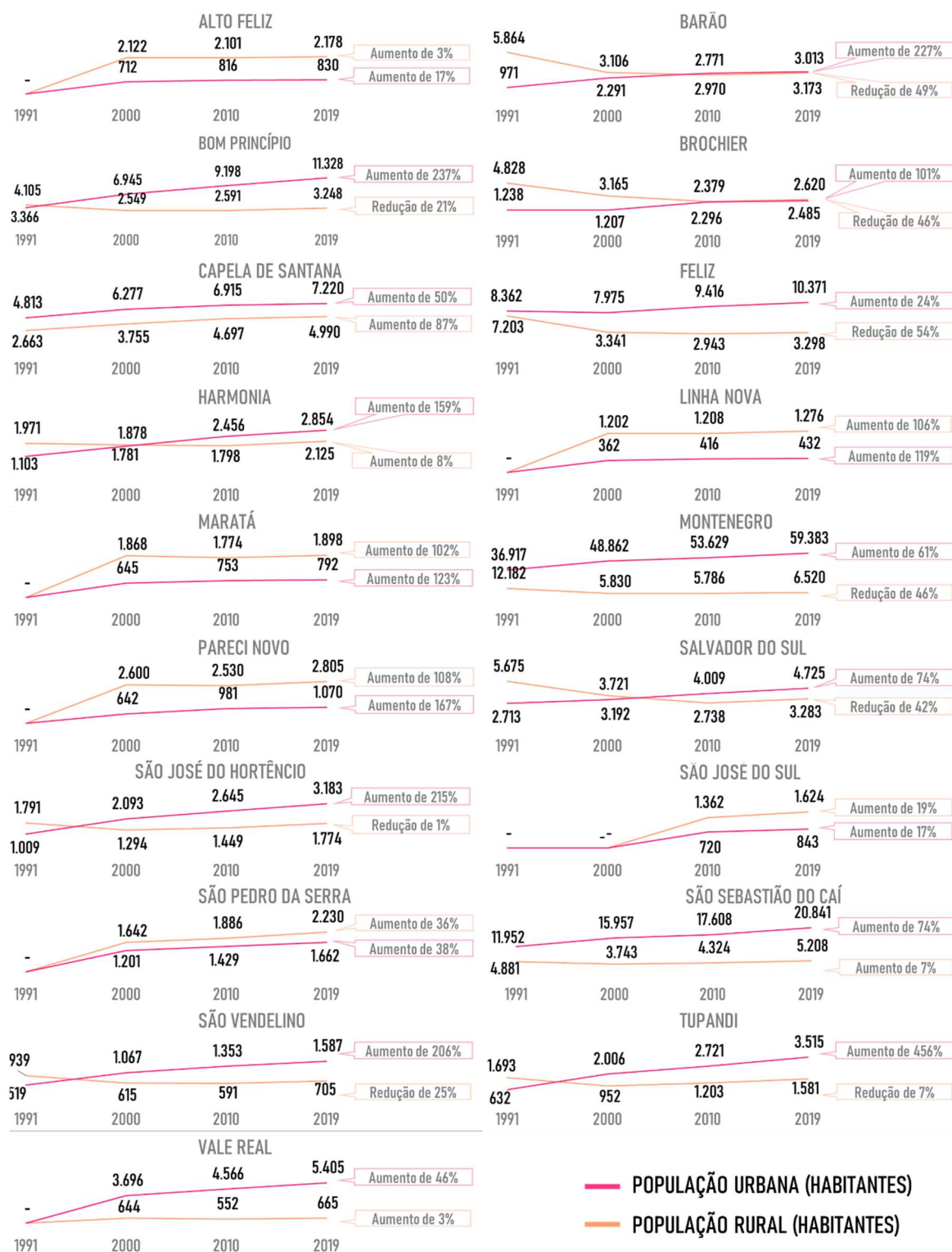


Figura 30: População Urbana e Rural, nos anos de 1991, 2000, 2010 e 2019, nos municípios do Vale da Felicidade. (Elaborado pela autora, com base em DataSebrae¹⁵)

¹⁵ Resultados da pesquisa “Perfil dos Municípios Gaúchos”. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/perfil-dos-municipios-gauchos>. Acesso em: 20 set. 2020.

Em 1991, apresentavam populações predominantemente rurais os municípios de São Vendelino, Tupandi, São José do Hortêncio, Harmonia, Brochier, Barão, Bom Princípio e Salvador do Sul. Em 2019, dos municípios fundados antes de 1991, apenas o município de Brochier manteve como majoritária a população rural. Também apresentaram tal característica os municípios de Alto Feliz, Linha Nova, São José do Sul, Maratá, São Pedro da Serra, Pareci Novo, todos com criação posterior a 1991.

A criação dos municípios na área de estudo teve origem, na maior parte dos casos, na divisão territorial de municípios que já existiam na região do Vale da Felicidade. De acordo com os dados apresentados por Moraes e Cunha (2018), o processo de definição do território iniciou-se em 1873, com a criação do município de Montenegro, e em 1875, com a criação de São Sebastião do Caí. A partir de 1959, a subdivisão de municípios, dentro da área de estudo, originou os municípios de Feliz, Salvador do Sul, Bom Princípio, Brochier, Harmonia, São Vendelino, Tupandi e Barão. No ano de 1991, a região do Vale do Rio Caí era constituída por 12 municípios. Em 20 de março de 1992, parte do território pertencente ao município de Feliz originou os municípios de Alto Feliz, Linha Nova e Vale Real. No mesmo dia, parte do território dos municípios de Brochier, Montenegro e Salvador do Sul deu origem aos municípios de Maratá, Pareci Novo e São Pedro da Serra. A partir dessa divisão territorial, em 19 de abril de 1996, parte dos municípios de Maratá, Montenegro e Salvador do Sul originou o município de São José do Sul. Essa dinâmica territorial é ilustrada na Figura 31.

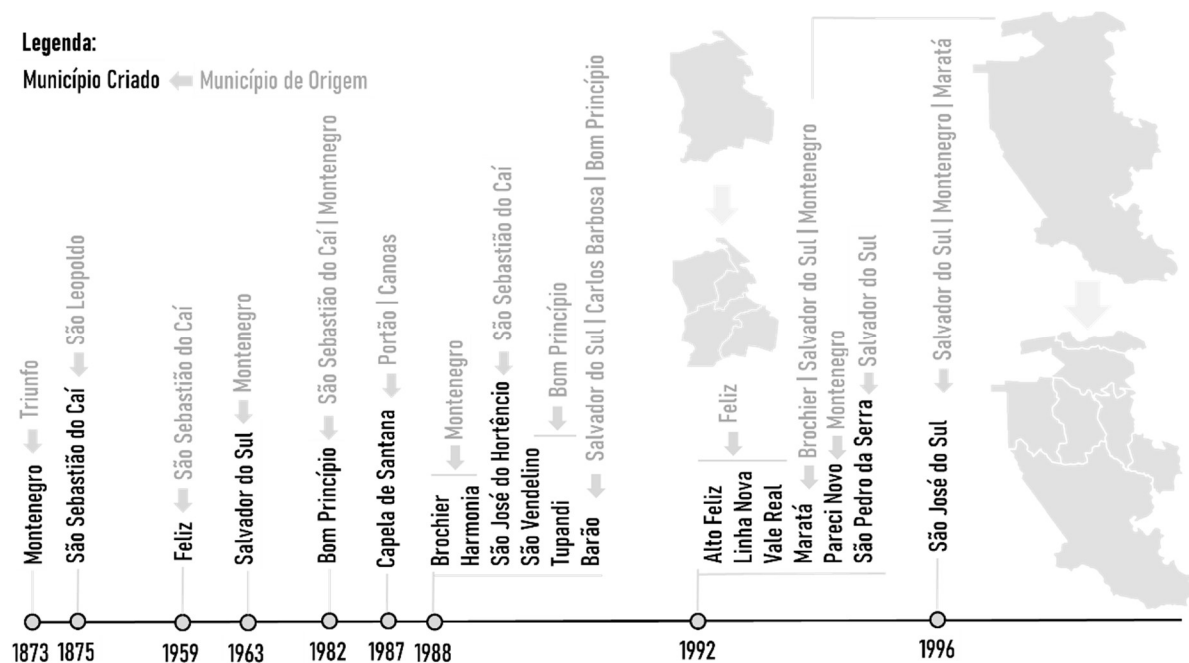


Figura 31: Criação de novos municípios no Vale da Felicidade, desde 1873, com ilustração da subdivisão territorial, a partir de 1992. (Elaborado pela autora, com base em Moraes e Cunha, 2018)

A história recente da região é marcada pelo surgimento de colônias agrícolas, no final do século XVII. Em 1820, imigrantes alemães chegaram ao estado do Rio Grande do Sul, fundando, entre 1844 e 1874, colônias no Vale do Rio Caí. Em 1870, as terras localizadas entre as bacias dos rios Caí, Antas e Taquari foram disponibilizadas, pelo governo, para a instalação de novas colônias agrícolas, o que deu início à colonização italiana em terras gaúchas. O desenvolvimento das colônias italianas foi semelhante ao das alemãs, com agricultura de subsistência, pequena produção excedente comercializável, difícil escoamento comercial e pequenas oficinas de artesãos (SEMA, 2008).

Inspirada nos bons índices de alfabetização, cultura, saúde, longevidade, segurança pública, harmonia familiar, crescimento econômico, belezas naturais, preservação do meio ambiente, a denominação da região, como Vale da Felicidade, é também fruto da visão para ela estabelecida:

O COREDE Vale do Caí tem a **visão** de vir a ser uma região, conhecida por seus habitantes e reconhecida pelos cidadãos de outras localidades, como sendo o Vale da Felicidade, onde há um bom padrão de vida, segurança pública, pleno emprego, equilíbrio entre trabalho e lazer, empreendedorismo, ambiente propício a permanentes inovações tecnológicas, intensa e profícua participação política, inclusão social, sem discriminações de qualquer natureza e o meio ambiente preservado (CODEVARC, 2010, p. 93, destaque da autora).

Tornar essa visão exequível requer o reconhecimento de um conjunto de fatores operacionalizáveis, que leve em consideração, não apenas as limitações físicas, ambientais, políticas e de recursos da região, mas também as **vocações** desta. As áreas estabelecidas como destaque, nesse sentido, pelo Conselho Regional de Desenvolvimento do Vale do Caí, estão apresentadas na Figura 32:

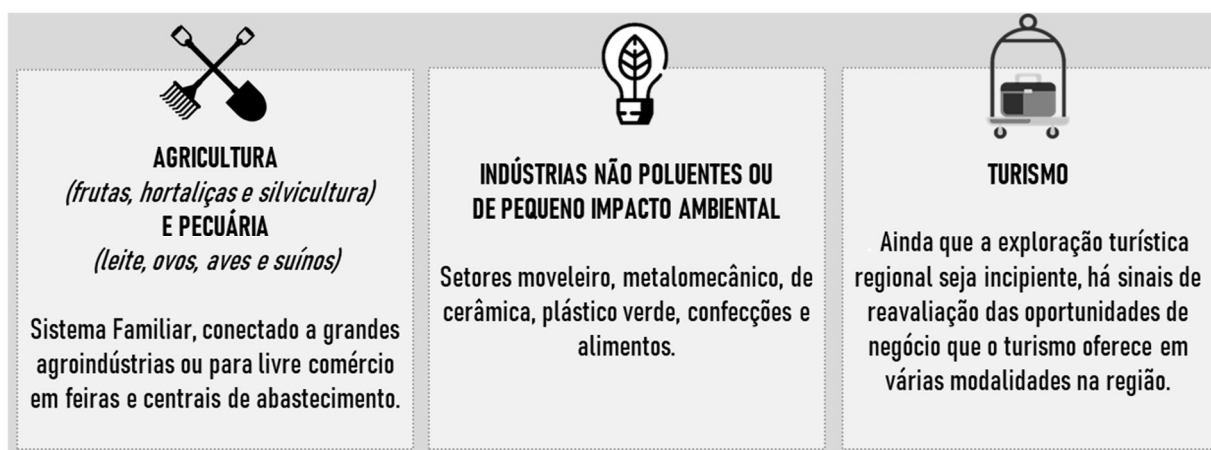


Figura 32: Vocações do Vale da Felicidade.
(Elaborado pela autora, com base em CODEVARC, 2010)

Além da integração administrativa, histórica, cultural e econômica, supramencionada, destaca-se que os municípios que compõem o Vale da Felicidade têm seu território majoritariamente inserido na bacia hidrográfica do rio Caí, conforme é possível observar na Figura 33.

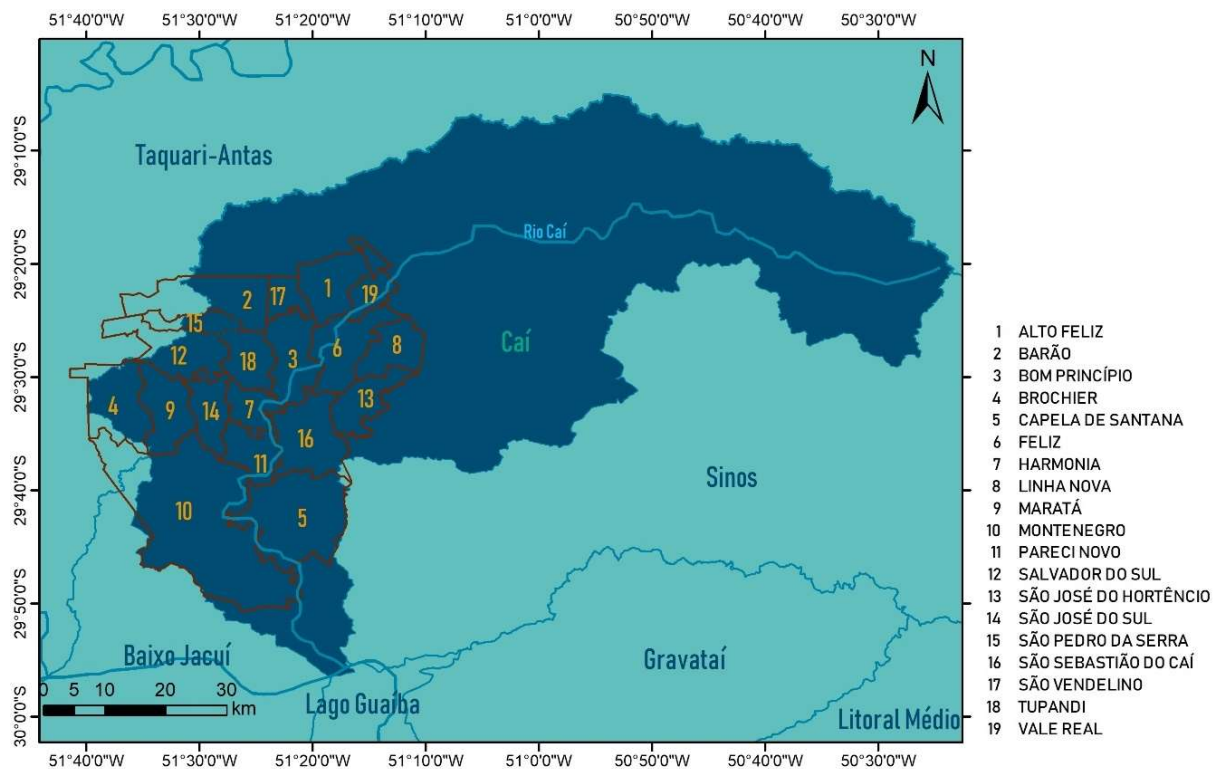


Figura 33: Hidrografia na região do Vale do Caí (RS).
(Elaborado pela autora, 2022)

A semelhança entre a divisão dos municípios e a delimitação da bacia hidrográfica revela uma importante característica da região, que aponta para uma potencialidade de facilitação na sua gestão urbana e ambiental, de forma integrada. Suas fronteiras administrativas – escala da tomada de decisão, na qual os planos e projetos tornam-se ações – coincidem com seus limites ambientais – escala na qual são definidos seus potenciais e riscos ambientais. Esse atributo distintivo reafirma a adequação da área de estudo, como uma unidade de referência para o planejamento de ações urbanas e ambientais integradas.

A altitude média da região é de 178,8 m. Situada predominantemente na área do Baixo Caí, a região sendo estudada possui declividade média de 13,3%. As características topográficas, entretanto, são variadas: o desvio padrão das declividades chega a cerca de 11,5%. As altitudes mais baixas e áreas mais planas são predominantes nas regiões centro e sul. Já, as maiores altitudes e as declividades mais acentuadas estão situadas na porção norte da área de estudo, no trecho baixo do Médio Caí. Na Figura 34 são apresentadas as distribuições espaciais das altitudes e das declividades, bem como um sumário das informações do relevo, por município.

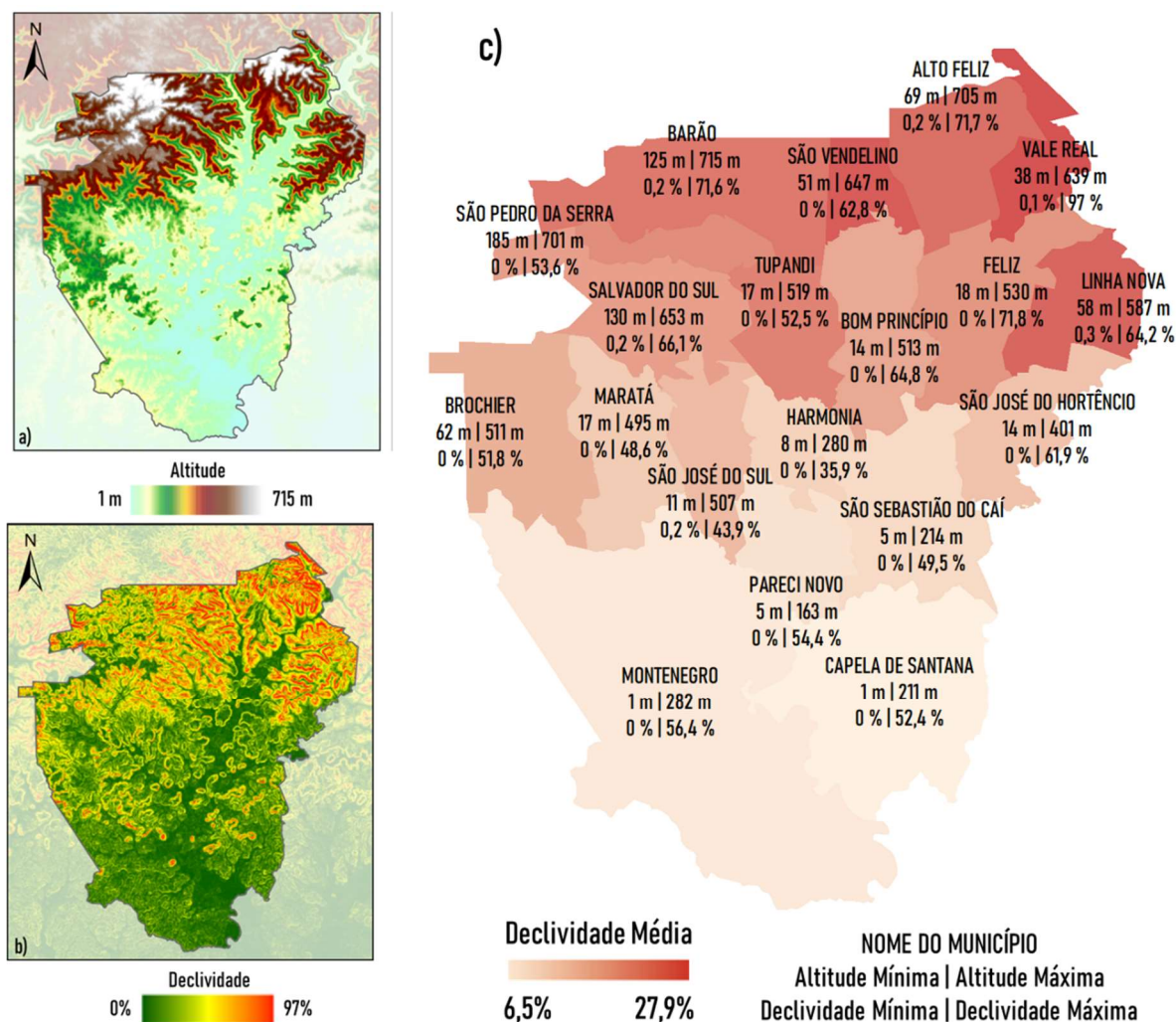


Figura 34: Relevo do Vale do Rio Caí: a) altitudes, b) declividades e c) sumário de altitudes e declividades, por município. (Elaborado pela autora, com base em Miranda, 2005).

O potencial agrícola das áreas de várzea estimulou a ocupação da planície de inundação do rio Caí pelos imigrantes (SEMA, 2008). Em virtude dessa característica histórica de ocupação, associada às baixas cotas e ao relevo plano do trecho do Baixo Caí, os habitantes têm que fazer frente a um dos maiores desafios da região, na atualidade: as cheias na bacia, principalmente as ocorrentes no trecho entre Montenegro e São Sebastião do Caí. Essa área está situada no sopé do planalto Meridional, em zona de vales fechados e abertos, susceptível a deslizamentos e enchentes repentinas. Trata-se de área de interface entre o Planalto Meridional e a Depressão Periférica.

Na Figura 35, é apresentado um resumo do levantamento realizado pela Secretaria de Meio Ambiente, do Estado do Rio Grande do Sul, por ocasião da elaboração do Plano de Bacia do

Rio Caí (SEMA, 2008), no qual são destacadas ocorrências de inundações e enchentes que atingiram alguns dos municípios do Vale da Felicidade, entre os anos de 2003 e 2008.



Figura 35: Eventos de cheias que atingiram alguns dos municípios do Vale da Felicidade, entre 2003 e 2008, causando danos significativos. (Elaborado pela autora, com base em SEMA, 2008)

Considerando as particularidades da região, em termos de suas vocações e limitações, o Plano Estratégico de Desenvolvimento Regional 2015-2030 propõe estratégias e ações para o desenvolvimento local, no sentido, não só de garantir a situação de desenvolvimento característica da região, mas, também, de explorar alternativas socioeconômicas complementares à economia regional. A combinação de ações de eficiência, de eficácia e de equidade fundamenta a concepção de tais estratégias, que buscam garantir a sustentabilidade econômica, ambiental e social (CODEVARC, 2017). As principais estratégias regionais estão resumidas na Figura 36, e apontam para a necessidade de que seja estabelecida uma relação integrada entre os municípios e sua biorregião.



Figura 36: Estratégias de desenvolvimento regional no Vale do Rio Caí.

(Elaborado pela autora, com base em CODEVARC, 2017)

Etimologicamente, uma biorregião representa um “lugar de vida”, definido por fronteiras naturais e cujas características geográficas, climáticas, hidrológicas e ecológicas favorecem o desenvolvimento de comunidades vivas, humanas e não humanas, únicas (NEWMAN; JENNINGS, 2008; THAYER, 2003).

As biorregiões podem ser definidas de forma variada, com base na geografia das bacias hidrográficas, ecossistemas vegetais e animais semelhantes, dos aterros relacionados e identificáveis (por exemplo, determinadas cadeias montanhosas, pradarias, ou zonas costeiras) e das culturas humanas únicas, que se desenvolvem de acordo com os limites e potenciais naturais da região. Sobretudo, a biorregião está a emergir como o local e escala mais lógica para que uma comunidade sustentável e regenerativa se enraíze e perpetue (THAYER, 2003, p. 3, tradução da autora).

Na abordagem das Cidades como Ecossistemas Sustentáveis, as cidades passam a ser entendidas como parte da biosfera. Por meio das economias biorregionais é possível ressignificar a produção local de alimentos, água, energia e a reciclagem de resíduos, favorecendo soluções adequadas aos padrões particulares do lugar e promovendo a diversidade nos fluxos de informação e nas trocas culturais (NEWMAN; JENNINGS, 2008). A avaliação desenvolvida nos capítulos seguintes busca analisar as relações complexas entre variáveis importantes no contexto do Vale da Felicidade, considerando sua biorregião.

5 ANÁLISE EXPLORATÓRIA: ESTUDOS POSSÍVEIS

5.1 OCUPAÇÃO DO TERRITÓRIO

A densidade populacional pode contribuir como orientadora de práticas urbanas direcionadas à sustentabilidade, uma vez que determina, diretamente, questões, como: o uso e a ocupação do solo; a acessibilidade a serviços; e a produção de alimentos. Tais questões são, todas, estratégicas no controle das mudanças climáticas e das emissões dos gases de efeito estufa.

Maiores densidades possibilitam reduzir o uso de recursos *per capita*, propiciando benefícios locais, regionais e globais. Pode-se verificar a existência de indicativos de que a premissa da baixa densidade, como fator de proteção aos recursos hídricos, pode estar equivocada, uma vez que densidades mais altas ocupam menores áreas de solo, *per capita*, o que reduz o uso de áreas ecologicamente sensíveis. As maiores densidades irão ampliar, também, as possibilidades de atendimento local das necessidades urbanas: desde uma escola, que pode ser acessada a pé, à implantação de sistemas de calefação, refrigeração e produção de energia distritais mais eficientes (FARR, 2013).

A cidade concentrada se apresenta como uma alternativa para minorar os problemas ligados à expansão, por meio do uso intensivo e inovador do espaço urbano, do crescimento dentro dos limites da cidade e de uma mistura de usos do solo. Em contrapartida, é possível destacar que a experiência real das cidades tem mostrado que há alguns problemas relacionados à cidade compacta, como os congestionamentos de veículos e um desenvolvimento que não é acompanhado por benefícios sociais claros (COLLIER et al., 2013).

Ainda que, em nível regional e na escala da bacia hidrográfica, as altas densidades sejam vantajosas, localmente os efeitos de alguns eventos extremos se tornam mais intensos, como os decorrentes de precipitação e de ondas de calor. Desta forma, a definição do gradiente de densidades ideal, em cada contexto, deve ser equacionada.

A Figura 37 ilustra algumas das principais variáveis relacionadas às densidades populacionais, no contexto da eficiência das cidades. Compreendendo-se as vantagens e desvantagens das diferentes concentrações populacionais, a ideia de policentricidade (concentração descentralizada) pode trazer benefícios em nível regional. Regiões conectadas física e funcionalmente podem ter sua implantação estimulada, por meio da promoção de cidades de

médio porte, com potencial endógeno, e da cooperação entre áreas urbanas (COLLIER et al., 2013; OSTROM, 2010).



Figura 37: Eficiência urbana, em diferentes concentrações populacionais.
(Elaborado pela autora, com base em Acioly e Davidson, 2011)

Alexander (2002) apresenta a ideia de que a vivacidade de um sistema espacial está associada à composição de seus centros e de suas densidades. Alexander et al. (1977) conduzem a discussão da gestão urbana, à luz das densidades das cidades: os autores apontam que tais densidades aumentam com a proximidade ao seu centro comercial, e recomendam o estabelecimento de gradientes mais harmônicos, que possibilitem acesso, tanto aos serviços e

conveniências das regiões mais densamente povoadas, como à calmaria típica das regiões menos densas.

A justificativa para o estabelecimento de gradientes de densidade não devem ser, entretanto, meramente econômicas. Tal situação ocorre quando a moradia passa a ser precificada de acordo com sua distância ao centro, devido à insuficiência de infraestrutura local de serviços, que atenda aos desejos e necessidades da comunidade. A restrição ao acesso e falta de autonomia na escolha da localização da habitação ilustra o que Sposati (2013) define como exclusão social – um processo múltiplo, que se explica por várias situações de privação: da autonomia; do desenvolvimento humano; da qualidade de vida; da equidade e da igualdade.

É fundamental que os custos sociais e a flexibilidade da política urbana sejam equacionados, de modo a refletir as expectativas da comunidade e serem suficientemente dinâmicos. Nesse contexto, as estratégias de gestão do uso do solo têm um papel importante na gestão de um espaço urbano com equidade de oportunidades. Informações que possam contribuir para o processo decisório baseado em dados são fundamentais nesse processo. Desta forma, nesta seção, a ocupação do território do Vale da Felicidade é avaliada, de acordo com dois aspectos, que estão fundamentalmente relacionados entre si: as densidades populacionais urbanas e a rede de cidades. O método proposto foi desenvolvido com base nos padrões Anéis de Densidade (Padrão 29) e Distribuição das Cidades (Padrão 2), de Alexander et al. (1977), abordados na seção 3.1.2.

Esta avaliação tem o intuito de ilustrar como técnicas de estatística espacial e de análise de redes podem contribuir para aprofundar o conhecimento sobre as pequenas e médias municipalidades brasileiras. Os resultados obtidos podem ser utilizados de maneira estratégica, com soluções adequadas para o uso do solo, e com o fortalecimento das redes locais, para atender à demanda por bens e serviços, e possibilitando a criação de cidades mais saudáveis e resilientes.

5.1.1 Detalhamento da metodologia

Os diversos centros geométricos de uma região podem ser facilmente calculados como a média das coordenadas correspondentes a cada atributo considerado. No que se refere à concentração populacional, entretanto, o seu centro ponderado, considera o ponto mais representativo do

núcleo urbano, em termos de densidade populacional, podendo ser sendo expresso pelo resultado da Equação 1:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_i^n x_i w_i}{\sum_i^n w_i}, \bar{Y}_w = \frac{\sum_i^n y_i w_i}{\sum_i^n w_i} \quad \text{Equação 1}$$

onde, x_i e y_i são as coordenadas da unidade de informação (o setor censitário, por município), e w_i , o atributo ponderador (as densidades populacionais).

O padrão Anéis de Densidade, proposto por Alexander et al. (1977) indica que, partindo da região central de maior densidade, envolvida por um círculo de raio R (ou semicírculo, considerando o padrão de núcleos excêntricos dos autores), os três anéis de densidades gradativas possuem raios equivalentes médios iguais a: $R/6$, $3R/6$ e $5R/6$. Desta maneira, propõe-se uma adaptação dessa abordagem aos aspectos explorados, por meio de elipses de distribuição direcional, com base no sistema de informações geográficas, como ilustrado na Figura 38.

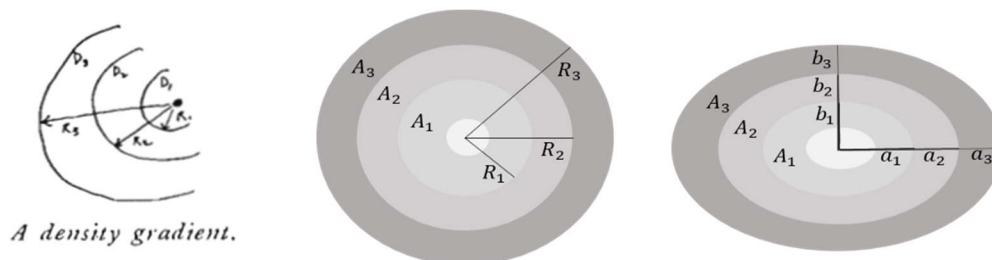


Figura 38: Adaptação da abordagem do padrão “Anéis de Densidade” (Padrão 29), considerando as elipses de distribuição direcional. (Elaborado pela autora, 2022)

Considerou-se, como ponto central, de maior densidade populacional, o centro médio ponderado pelas densidades populacionais, quantificadas e espacializadas a partir dos setores censitários. Para o cálculo da densidade populacional, foi considerada: a população residente no setor censitário; e a área do setor censitário.

A direcionalidade observada na ocupação dos municípios foi considerada, adotando-se uma elipse de distribuição direcional, de um desvio padrão, como delimitadora do anel externo. Essa delimitação será identificada, nas análises desenvolvidas neste trabalho, como Centro de Densidade Populacional (CDP).

Os anéis elípticos foram traçados, mantendo-se as proporções sugeridas por Alexander et al. (1977), porém preservando-se as excentricidades das elipses, decorrentes da tendência de ocupação. Desta maneira, a relação matemática, para o traçado dos Anéis de Densidade, parte dos resultados obtidos com o uso da Equação 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{b} = \frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3} \\ \pi \cdot a_3 \cdot b_3 - \pi \cdot a_2 \cdot b_2 = \frac{\pi \cdot 25 \cdot a \cdot b}{36} \\ \pi \cdot a_2 \cdot b_2 - \pi \cdot a_1 \cdot b_1 = \frac{\pi \cdot 9 \cdot a \cdot b}{36} \\ \pi \cdot a_1 \cdot b_1 = \frac{\pi \cdot 1 \cdot a \cdot b}{36} \end{array} \right. \quad \text{Equação 2}$$

A obtenção da elipse de distribuição direcional representativa do CDP, leva à definição dos valores dos eixos maior e menor da elipse, respectivamente a_3 e b_3 . Uma vez determinados tais valores, e considerando as relações da Equação 2, as elipses intermediária (definida por a_2 e b_2) e central (definida por a_1 e b_1) podem ser definidas, conforme relações apresentadas na Equação 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{6}{\sqrt{35}} \cdot a_3; \quad e \quad b = \frac{6}{\sqrt{35}} \cdot b_3 \\ a_2 = \frac{\sqrt{10}}{6} \cdot a; \quad e \quad b_2 = \frac{\sqrt{10}}{6} \cdot b \\ a_1 = \frac{1}{6} \cdot b; \quad e \quad b_1 = \frac{1}{6} \cdot b \end{array} \right. \quad \text{Equação 3}$$

Já, a análise da rede de cidades que compõe o Vale da Felicidade, teve, como ponto de partida, o padrão de Distribuição das Cidades, de Alexander et al. (1977) – conforme abordado na seção 3.1.2 (Figura 12, p. 54). Uma função potencial foi ajustada aos pares de valores de população e de distância entre as cidades.

É importante ressaltar que, de acordo com o padrão, as distâncias propostas são medidas entre cidades de portes semelhantes. Dessa forma, os centros urbanos foram divididos, de acordo com a estimativa da população residente em seu CDP. Para tal, os 19 municípios foram classificados em cinco classes, pelo método das Quebras Naturais — ou *Jenk's Natural Breaks* (JENKS, 1967). Com base em agrupamentos naturais inerentes aos dados, são identificados os limites de classe que melhor agrupam valores similares, maximizando as diferenças entre as classes.

Em seguida, as distâncias entre os centros de mesma classe foram estimadas pela função potencial ajustada. Além da faixa de valores de distâncias, estimada entre centros de mesma classe, foram calculadas as áreas de serviço da rede. Tal área abrange todos os locais acessíveis à distância estimada para cada centro, considerando a rede viária. Por sua vez, a rede viária foi obtida a partir de consulta à base de dados gratuitos e colaborativos *Open Street Maps* (OSM).

A análise dos vínculos entre as cidades e a caracterização de sua influência na rede de cidades, no Vale da Felicidade, foram feitos com base em informações do estudo *Regiões de Influência das Cidades* (IBGE, 2018). As ligações para o atendimento às necessidades entre as cidades, em cada temática, são classificadas de acordo com a sua maior frequência identificada. Os destinos principais são classificados como ligações de primeira ordem, sendo eles: daquele de maior frequência até os destinos com valor 5% inferior ao maior percentual. As ligações de segunda ordem correspondem àquelas ligações cuja frequência corresponde a todos os destinos de 5% a 10% inferiores, em relação ao mais frequente. Por fim, nas ligações de terceira ordem, estão os destinos que receberam percentual de 10% a 15% inferiores ao mais frequente. De acordo com a metodologia do estudo, todas as cidades possuem, pelo menos, uma ligação de primeira ordem, correspondente ao destino principal; as demais ordens apenas são representadas na medida em que outros destinos citados em cada questão alcancem os intervalos percentuais estabelecidos (IBGE, 2018). Na Figura 39, apresenta-se um exemplo ilustrativo da classificação das ligações, por ordem de frequência.

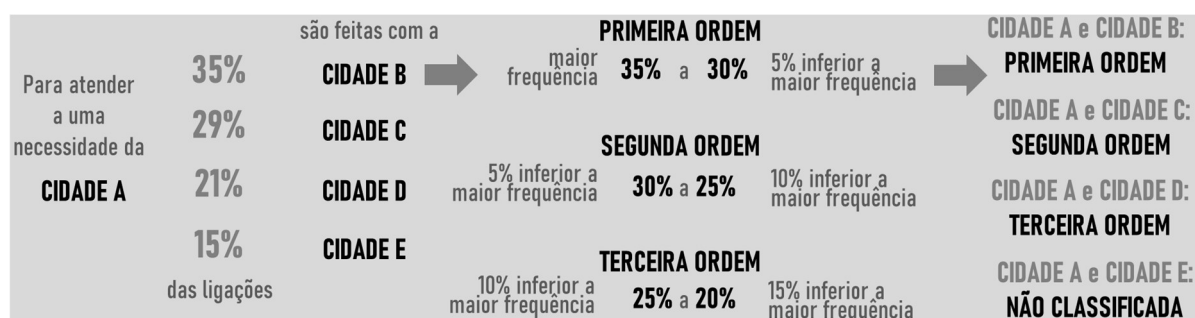


Figura 39: Exemplo ilustrativo da classificação das ordens de frequência de ligação entre cidades.
(Elaborado pela autora, 2022)

5.1.2 Densidade e sustentabilidade

As densidades populacionais no Vale da Felicidade podem ser observadas na Figura 40. Verifica-se que há, de forma geral, uma concentração das maiores densidades, próxima ao centro urbano dos municípios. São observadas graduais reduções, à medida que há o afastamento desses núcleos. A maior concentração urbana, tanto em termos de extensão territorial por ela ocupada, quanto em termos de densidade, foi identificada como ocorrente no município de Montenegro, como também pode ser observado na Figura 40.

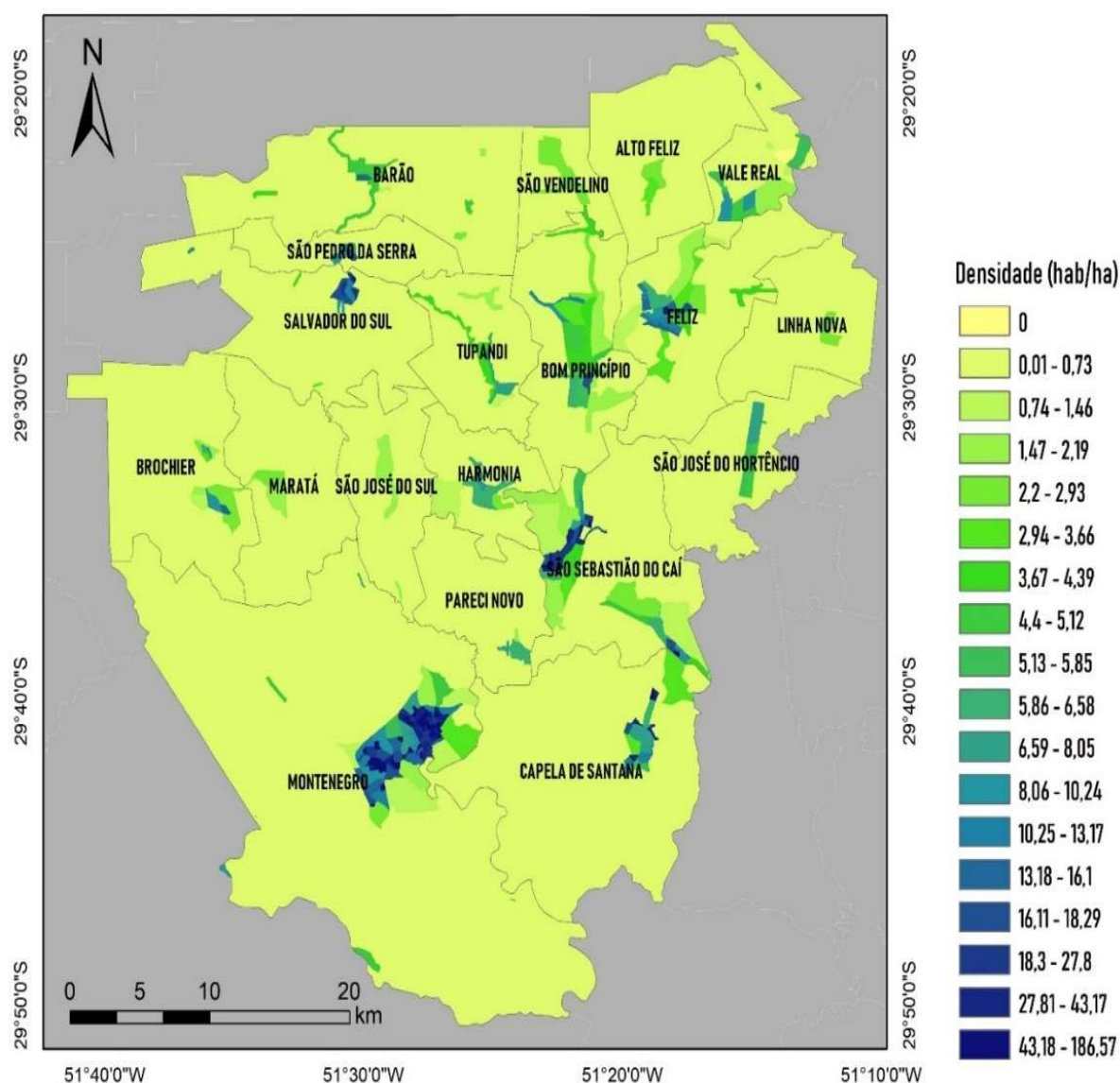


Figura 40: Densidades populacionais no Vale do Caí (RS).
(Elaborado pela autora, com base em IBGE, 2010)

Uma transição gradual entre núcleos de densidade é perceptível entre os municípios de Bom Princípio e Feliz, e entre Harmonia e São Sebastião do Caí – nestes cenários, a percepção quanto à proximidade ao centro urbano é claramente definida pela densidade populacional. Já, os municípios de Capela de Santana e São Sebastião do Caí compartilham o que pode ser considerado como um segundo núcleo de concentração de densidade, no qual as características de gradação estão presentes.

Não é perceptível, em nível de setores censitários, a ocorrência de densidades variando gradativamente nas áreas urbanas de Alto Feliz, Linha Nova, São José do Sul e São Vendelino, cujos núcleos centrais possuem densidades apenas ligeiramente superiores às das áreas rurais. Percebe-se que a área central de Maratá, embora não sendo possível identificar variações de densidade, conecta-se à região urbana de menor densidade, de Brochier, que, por sua vez, apresenta dois núcleos de densidade isolados, dentro das fronteiras do próprio município. Uma concentração urbana com maior densidade, ainda que sem grande variação, é observada em São Pedro da Serra e Salvador do Sul.

Na Figura 41, é possível observar o posicionamento dos centros médios geométricos e dos centros médios ponderados pelas densidades, nos municípios do Vale da Felicidade.

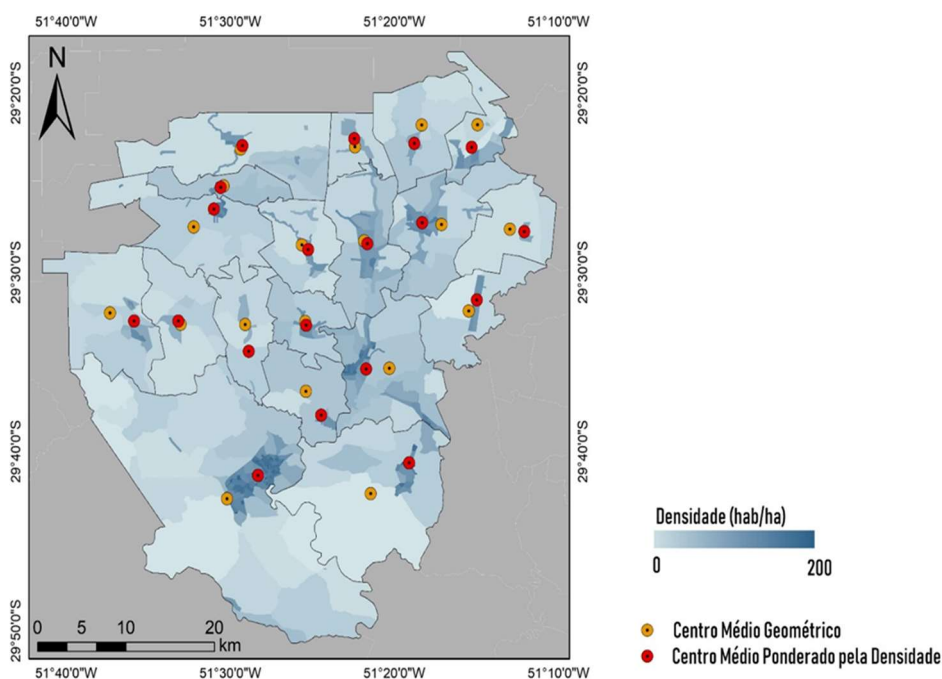


Figura 41: Centros médios geométricos e ponderados pela densidade.
(Elaborado pela autora, com base em IBGE, 2010)

Para a medição do grau de concentração ou de dispersão das densidades, em torno do seu centro médio ponderado, foi avaliada a distribuição direcional das concentrações, a partir da elaboração de elipses de desvio padrão, apresentadas na Figura 42.

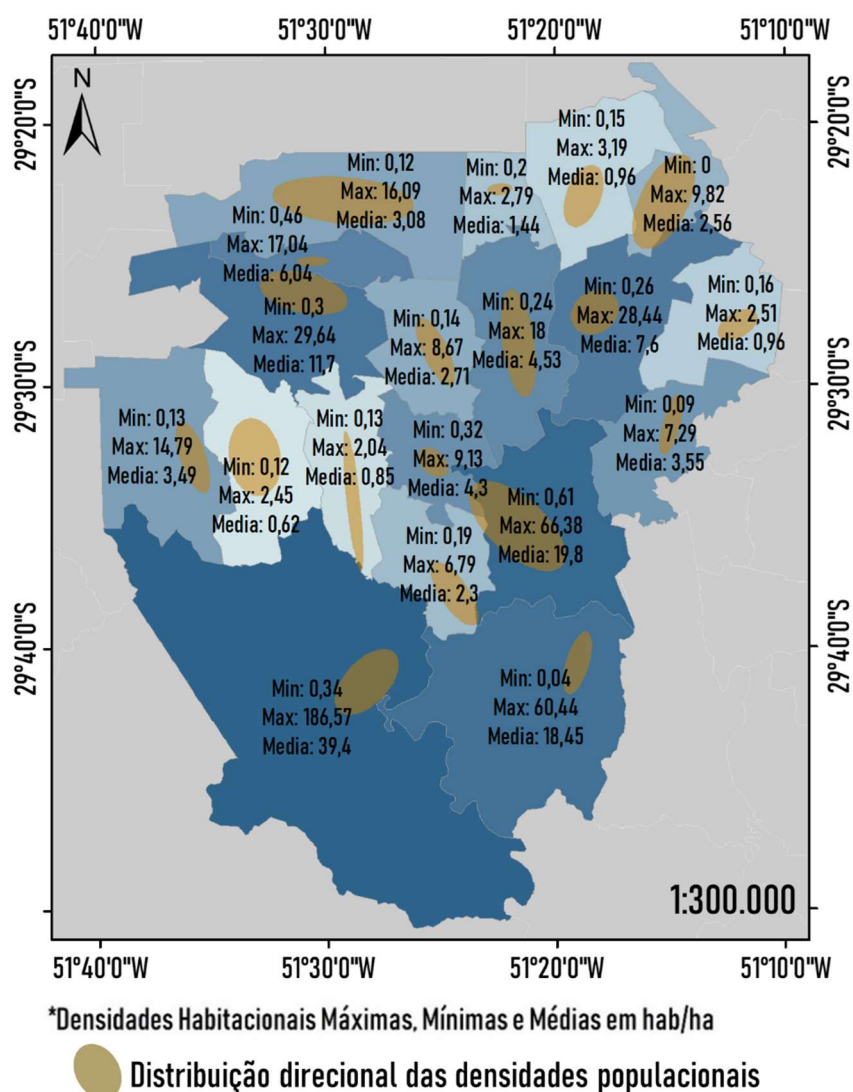


Figura 42: Densidades populacionais e distribuição direcional no Vale do rio Caí.
(Elaborado pela autora, 2022)

Os eixos das elipses indicam o desvio padrão das coordenadas x e y, em relação ao centro médio ponderado pelas densidades, demonstrando a orientação específica na distribuição dessas densidades, em cada município. Os desvios padrão auxiliam na compreensão da dispersão de ocupação, ilustrando, basicamente, três características: a localização média, sua dispersão ou concentração, e a orientação da distribuição.

Foram observados quatro padrões de Anéis de Densidade, apresentados, e brevemente descritos, na Figura 43. Cada município será, a seguir, avaliado em suas particularidades e dentro de sua inserção no contexto regional.




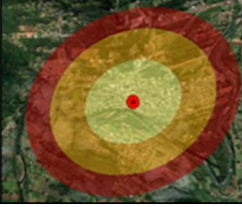

Padrão	Descrição	Municípios	Ilustração
Padrão 01	Gradiente de densidade populacional com redução à medida que se distancia do centro.	Alto Feliz, Feliz, Harmonia, Linha Nova, Maratá, São Pedro da Serra, São Vendelino, Salvador do Sul, Tupandi, Barão, São José do Hortêncio.	
Padrão 02	Anel elíptico central com densidade intermediária, segundo anel com densidades superiores e terceiro anel com menor densidade na periferia.	Bom Princípio, Pareci Novo.	
Padrão 03	Anel elíptico próximo ao centro com menor densidade, segundo anel com densidades superiores e terceiro anel com densidade intermediária.	São Sebastião do Caí, Vale Real.	
Padrão 04	Gradiente de densidade populacional com aumento à medida que se distancia do centro.	Brochier, Capela de Santana, Montenegro, São José do Sul.	
Legenda:			
			
<p>Maior densidade populacional Densidade populacional média Menor densidade populacional</p>			

Figura 43: Padrões de gradientes de densidade populacional.
(Elaborada pela autora, 2022)

Em 11 dos municípios da região do Vale do Caí foram obtidos gradientes de densidade, de acordo com o sugerido no padrão de Alexander *et al.* (1977), ou Padrão 01, conforme Figura 43, acima. Fazem parte desse grupo os municípios de Alto Feliz, Linha Nova e São José do Hortêncio, cujos gradientes de densidades estão apresentados na Figura 44. O alongamento das elipses reflete o padrão de ocupação nas cidades, influenciadas pela presença de rodovias e vias locais. Em São José do Hortêncio, o alongamento mais acentuado no sentido norte-sul, indica uma maior dispersão das densidades nesse sentido.

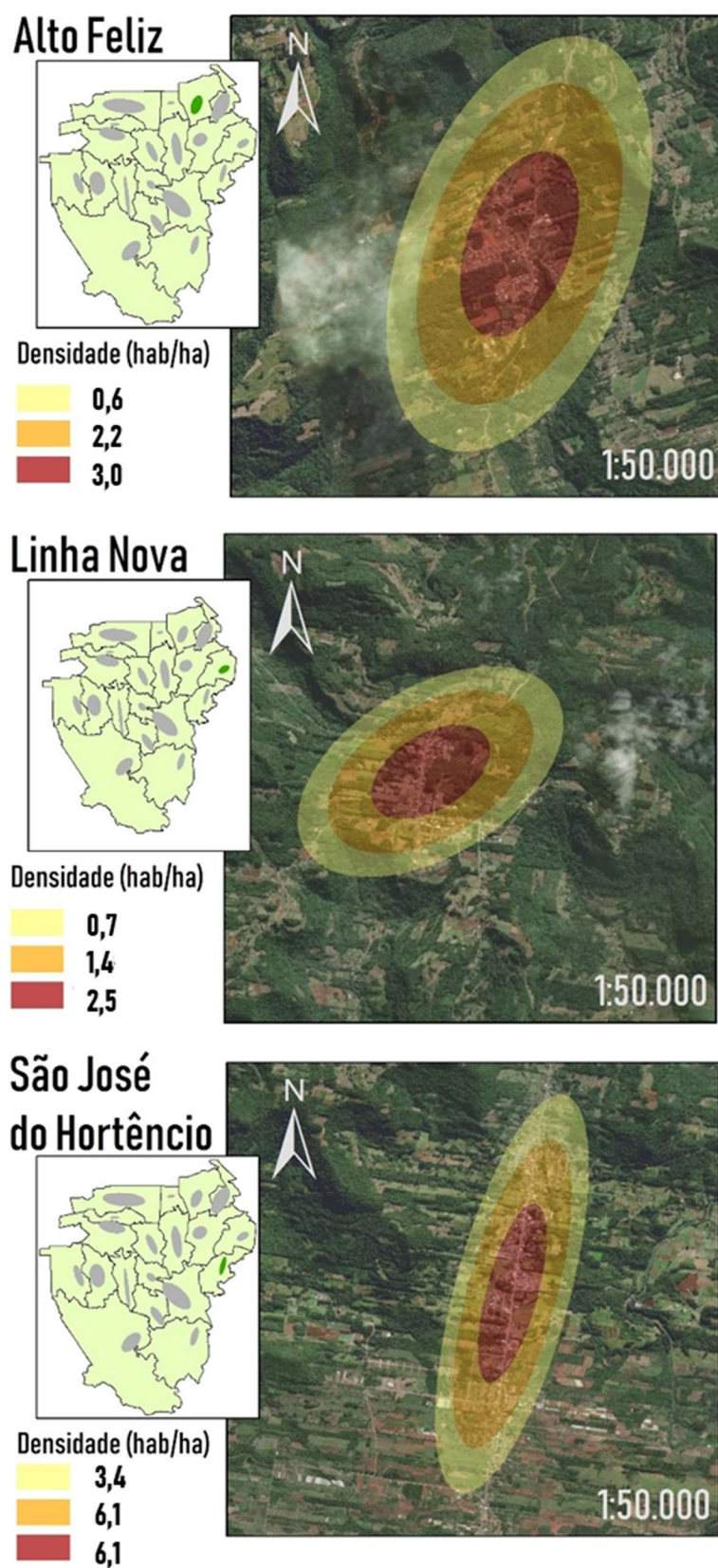


Figura 44: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Alto Feliz, Linha Nova e São José do Hortêncio.
(Elaborada pela autora, 2022)

No município de Salvador do Sul, há uma direcionalidade não expressa pela elipse, que ocorre em função da influência da área urbana do município de São Pedro da Serra. Este, teve sua gestão política e administrativa ligada a Salvador do Sul, até 1992, quando se tornou município, através da Lei Estadual nº 9.613 (RIO GRANDE DO SUL, 1992). As direcionalidades de distribuição indicam que as densidades mais altas estão concentradas na direção norte-sul, evidenciando a relação da ocupação entre São Pedro da Serra e Salvador do Sul, conforme é ilustrado na Figura 45. Destaca-se que, para o cálculo das elipses de distribuição direcional e do centro de densidades, foram considerados os limites municipais. Entretanto, a ocupação policêntrica existente na área em questão indica que a análise integrada dos dois municípios pode levar a resultados mais representativos da realidade local.



Figura 45: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Salvador do Sul e São Pedro da Serra.
(Elaborada pela autora, 2022)

A influência de corpos d'água na ocupação do território é evidenciada, de forma direta e indireta, nos municípios de Tupandi, Harmonia (Padrão 01) e Pareci Novo (Padrão 03). No município de Tupandi, além da estrada RS-415, o arroio Salvador do Sul também é um elemento importante, como determinante da forma da ocupação do território. No município de Harmonia, o arroio Salvador do Sul também exerce influência, já que ao longo do mesmo é que são observadas as maiores densidades. Observa-se que o rio Caí, ainda que não inserido na elipse de distribuição das densidades, exerce influência em sua direcionalidade. A localização do CDP em Pareci Novo, indica que o desenvolvimento urbano do município se desenvolveu entre o rio Caí e o morro central. Os gradientes de distribuição podem ser visualizados na Figura 46.

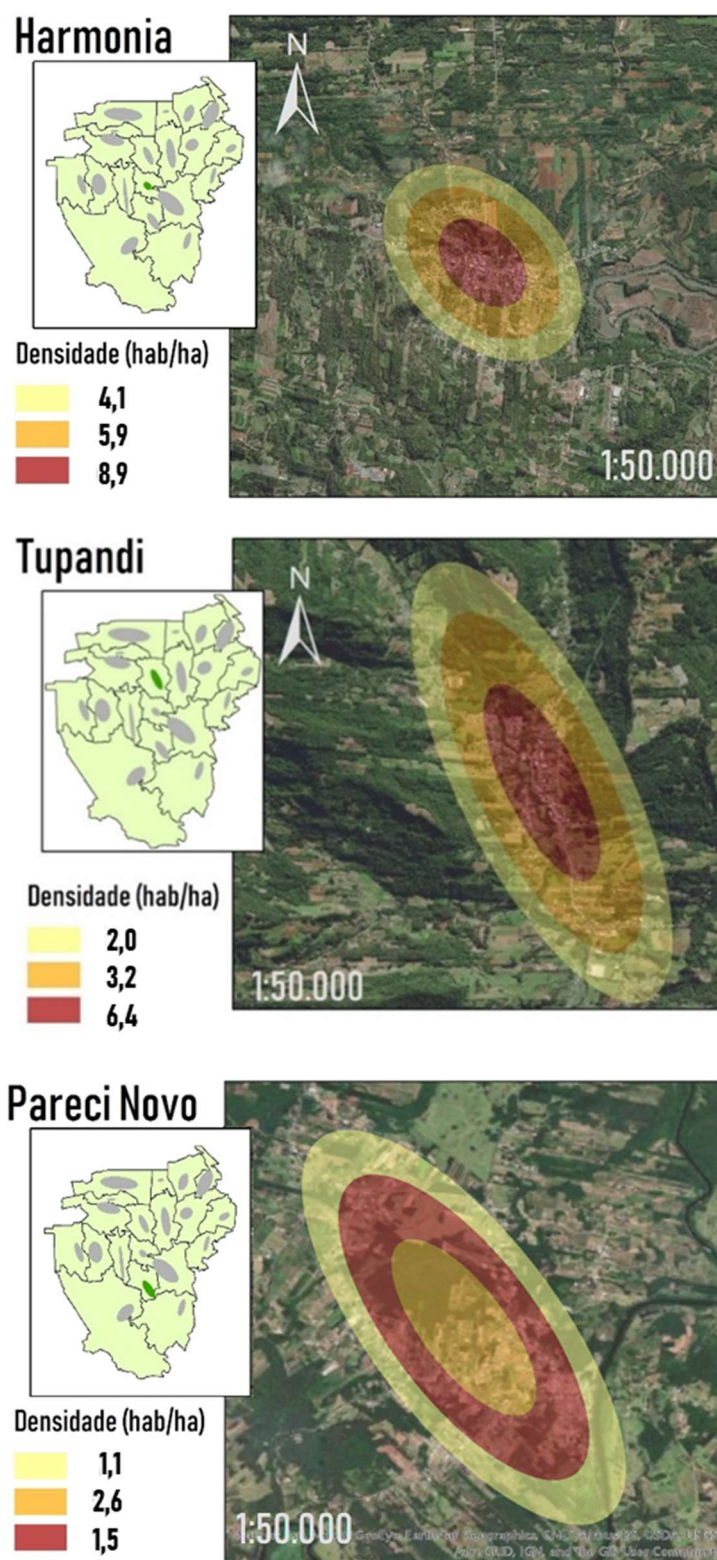


Figura 46: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Harmonia, Pareci Novo e Tupandi.
(Elaborada pela autora, 2022)

Nos municípios de Barão, Maratá e São Vendelino, ainda que seja observado um gradiente de densidades regressivo, as elipses não estão centralizadas sobre a mancha urbana. No município de Barão, além da dispersão significativa das concentrações populacionais ao longo da rodovia BR-470, é possível identificar um núcleo de maior densidade, isolado, a oeste do centro da cidade. A presença desse núcleo influencia a o posicionamento das elipses e o seu deslocamento em relação ao centro da mancha urbana principal. O município de Maratá apresenta distribuição das densidades dispersa, no sentido norte-sul, que desloca a centralidade das elipses da mancha urbana. No município de São Vendelino, mesmo que com densidades pouco dispersas no sentido norte-sul, o município apresenta dois núcleos de ocupação próximos, ligados pela estrada RS-446 e ao longo do arroio Mauá.

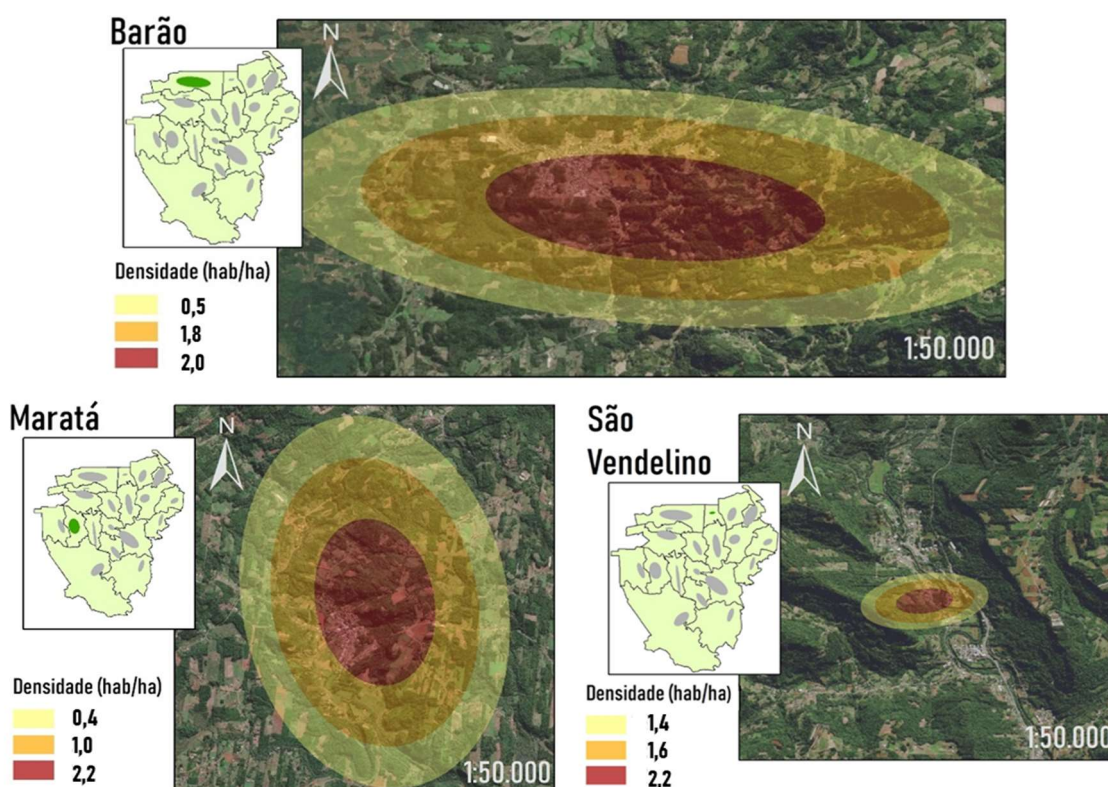


Figura 47: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Barão, Maratá e São Vendelino. (Elaborada pela autora, 2022)

Nos municípios de Capela de Santana, Montenegro (Padrão 02), Bom Princípio (Padrão 03), São Sebastião do Caí e Vale Real (Padrão 4), é possível observar a presença de núcleos

policêntricos. Desta forma, o CDP é deslocado a um ponto intermediário, entre esses núcleos de ocupação, conforme ilustra a Figura 48.

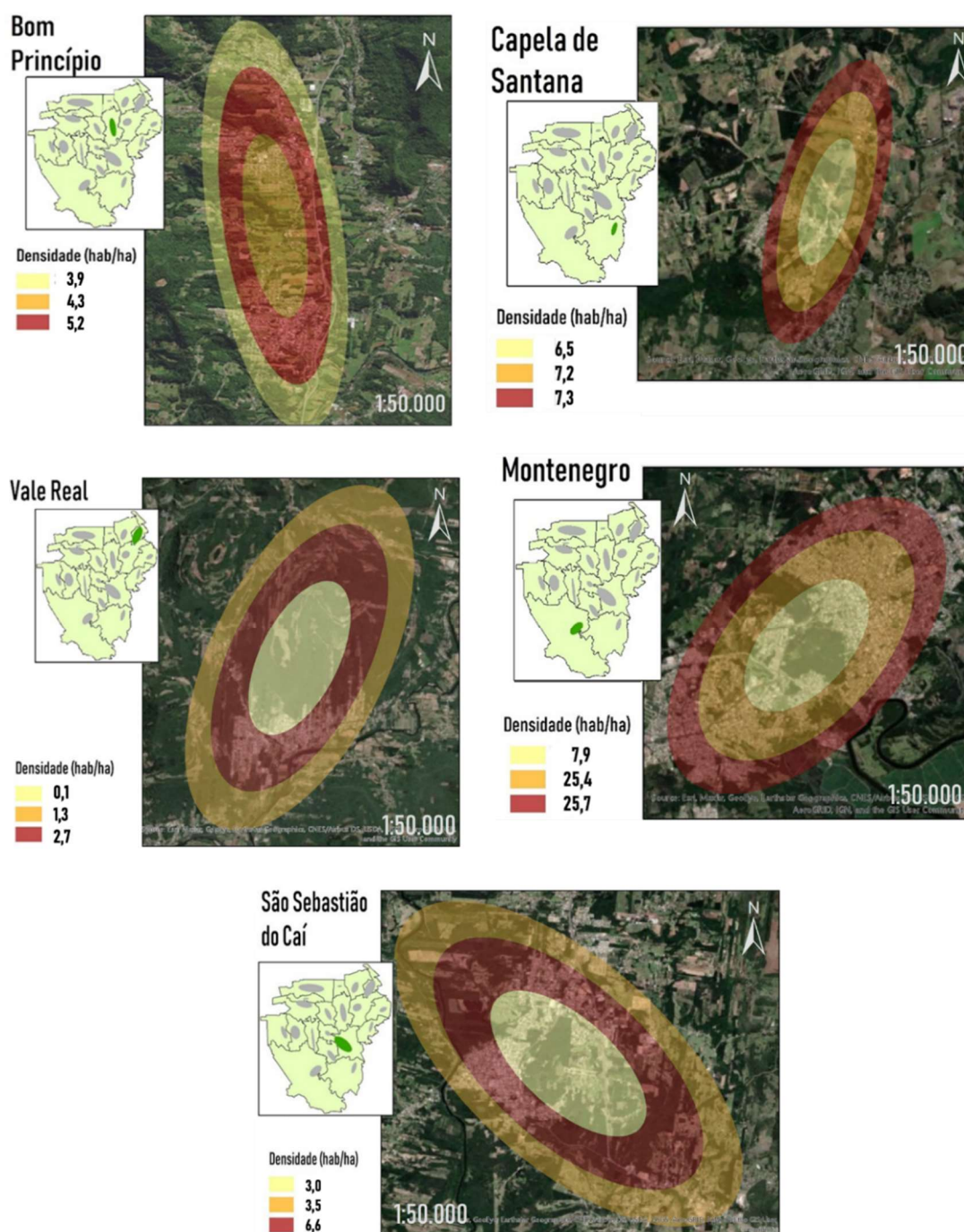


Figura 48: Gradientes de densidades populacionais dos municípios de Bom Princípio, Vale Real, São Sebastião do Caí, Capela de Santana e Montenegro.
(Elaborada pela autora, 2022)

No município de Bom Princípio, o padrão observado de ocupação do seu território é justificado pela presença de dois núcleos urbanos, que ocorrem ao longo do arroio Mauá e da estrada RS-122. No município de Vale Real, as maiores densidades ocorrem, principalmente, ao longo da estrada RS-452 e do rio Caí.

Um padrão semelhante é observado no município de São Sebastião do Caí, onde o núcleo principal está localizado entre o rio Caí e a Avenida Dr. Bruno Cassel, que conecta o município à estrada RS-122. A ocupação dispersa se destaca, principalmente, no eixo noroeste-sudeste, no qual é possível identificar o surgimento de ocupações habitacionais afastadas do núcleo, ao longo da RS-122, e que conectam essa ocupação ao município de Capela de Santana.

O município de Capela de Santana, obteve sua emancipação do município de São Sebastião do Caí em 1987, através da Lei Estadual nº 8.456 (Rio Grande do Sul, 1987). Na sua forma de ocupação urbana é possível identificar conexões com o município de origem, o que é expresso pelo eixo maior de dispersão das densidades. O padrão de ocupação de Capela de Santana é bastante particular, com a presença de quatro núcleos, interconectados por corredores de ocupação.

No município de Montenegro, a ocupação é conformada pela topografia, ocorrendo em torno do Morro São João. O modelo proposto por Alexander et al. (1977), que prevê a consideração de semicírculos (ou meias-elipses, no caso da adaptação aqui realizada) para o traçado dos Anéis de Densidade, seria mais adequado para a análise particular do município.

O método de avaliação das densidades proposta não se adequa à situação específica de dois municípios: Brochier e São José do Sul – Padrão 02. No município de Brochier, as dispersões acentuadas indicam que o traçado de elipses é pouco representativo da mancha urbana. No município de São José do Sul, é observada a presença de dois núcleos de ocupação relativamente distantes, o que leva a uma dispersão significativa no sentido norte-sul, ilustrada pelo alongamento da elipse nesse sentido. Os resultados, ainda que pouco assertivos quanto à localização de um núcleo central, permitem uma avaliação das tendências de ocupação, em nível municipal.

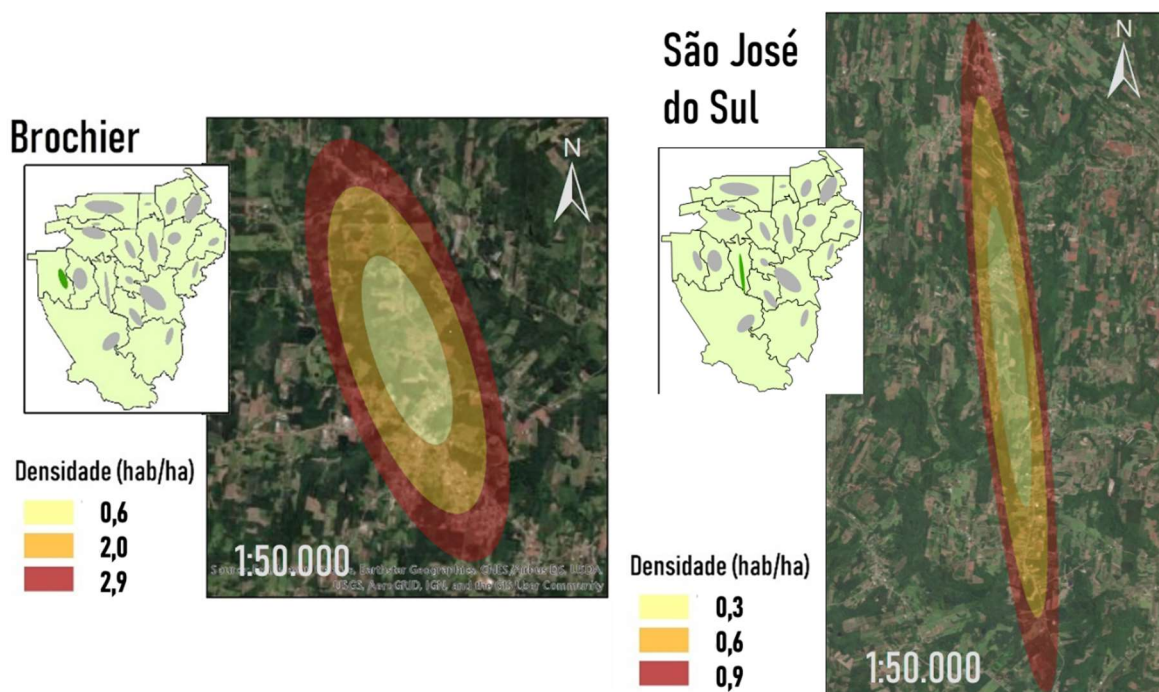


Figura 49: Gradientes de densidade, nos municípios de Brochier e São José do Sul.
(Elaborada pela autora, 2022)

O resultado mais interessante foi obtido quando analisado o município de Feliz, e está apresentado na Figura 50. A ocupação no município apresenta pouca dispersão na distribuição das densidades populacionais. As direcionalidades da elipse indicam uma tendência de ocupação concêntrica ao núcleo de máxima densidade de ocupação, o que explica o seu aspecto de circunferência. O desenvolvimento da cidade ocorre entre a estrada RS-452 e o rio Caí, e o núcleo da distribuição de máximas densidades abrange a área central da mancha urbana. Os gradientes de densidade, portanto, estão em consonância com o padrão previsto por Alexander *et al.* (1977). A distribuição da população, em torno do centro de máxima densidade, pode ser apontada como um dos fatores decisivos para a ocupação e uso dos recursos de forma eficiente, contribuindo para que o município seja uma referência quanto à sustentabilidade.

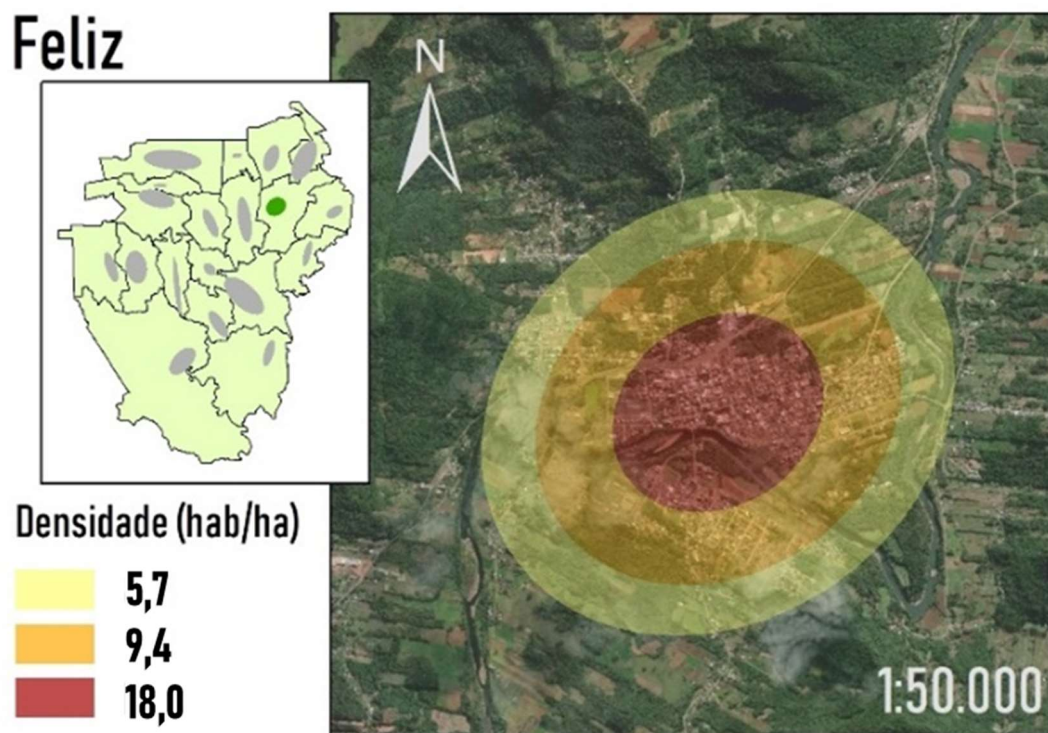


Figura 50: Gradientes de densidades populacionais do município de Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

Embora os gradientes de densidade possam representar, em si, uma ferramenta analítica útil para a compreensão da ocupação do território, sua relevância está, sobretudo, na possibilidade de seu uso como método analítico, para dar suporte ao projeto urbano. Nesse sentido, os gradientes de densidade, quando avaliados em conjunto com outras variáveis importantes, poderão auxiliar na elucidação de questões fundamentais à sustentabilidade urbana, como a infraestrutura de saneamento e as conexões urbano-rural.

Um exemplo da aplicação do conceito de gradientes de densidades populacionais, como orientador para proposição de soluções sustentáveis para o tratamento de esgotos domésticos, pode ser observado na Figura 51. A estratégia de utilização dos gradientes para nortear soluções sustentáveis pode ser considerada simples, eficiente e de baixo custo, no sentido de articular informações sobre a maneira de melhor ocupar um determinado território, além de melhor embasar a tomada de decisão. Essa estratégia pode ser extrapolada para a avaliação de ações de planejamento de outras naturezas, de modo a contribuir para a resiliência das comunidades (SILVA *et al.*, 2020). Nesse sentido, os CDPs dos municípios do Vale da Felicidade, cujos resultados estejam mais alinhados ao do padrão de referência, serão utilizados como recorte para o estudo de questões intraurbanas, na presente pesquisa.

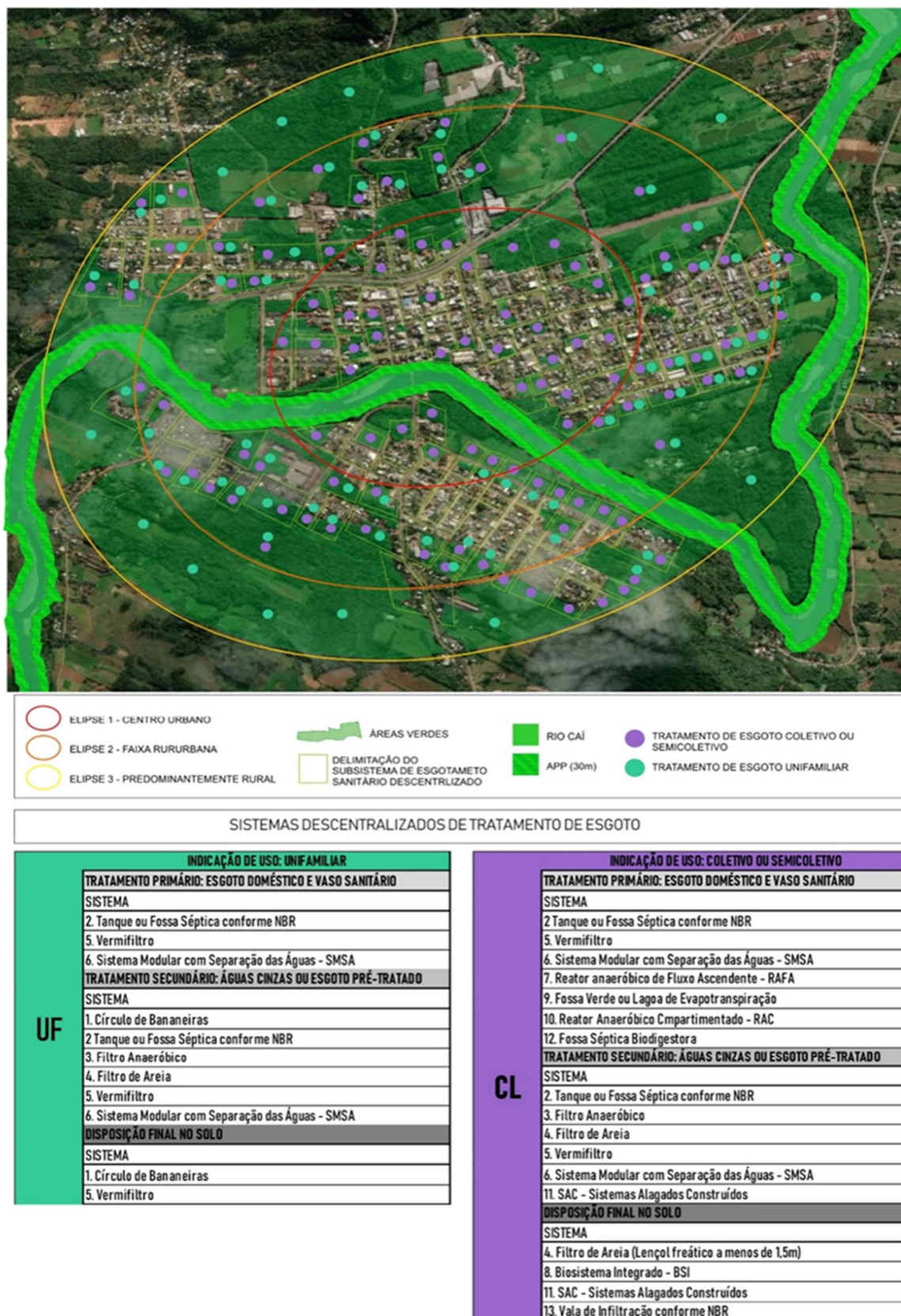


Figura 51: Soluções para esgotamento sanitário, com base na densidade, para o município de Feliz/RS. (Elaborada e publicada pela autora em Silva et al., 2020)

5.1.3 Rede de cidades

O ajuste entre População e Distância entre cidades, conforme o Padrão Distribuição de Cidades (ALEXANDER et al., 1977), apresenta elevada correlação ($R^2 = 0,9998$), conforme ilustrado na Figura 52:

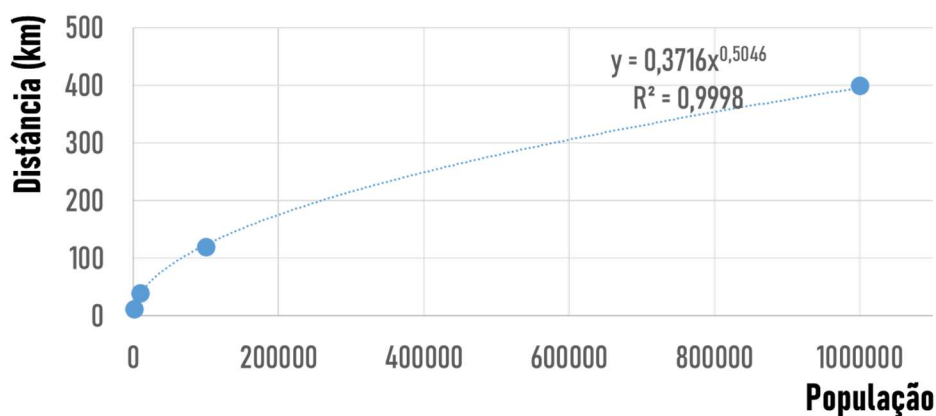


Figura 52: Ilustração do ajuste, de acordo com o padrão de Distribuição das Cidades.

(Elaborada pela autora, 2022, com base em Alexander et al., 1977)

Os resultados da classificação dos municípios, de acordo com a populações residentes nos CDPs, podem ser observados na Figura 53 (a). Na Figura 53 (b), os círculos maiores identificam as distâncias correspondentes aos limites populacionais de cada classe, se calculadas conforme a função potencial, ajustada e apresentada na Figura 52. Os pontos coloridos distribuídos sobre a Figura 48 (b) representam as distâncias entre os municípios de mesma classe. A análise da distribuição dos centros urbanos na imagem permite verificar que, embora apenas **uma ligação** entre cidades esteja dentro dos parâmetros aqui delimitados, não existem discrepâncias significativas em relação aos limites esperados, se comparados com as distâncias referidas no padrão de Distribuição das Cidades, de Alexander et al. (1977).

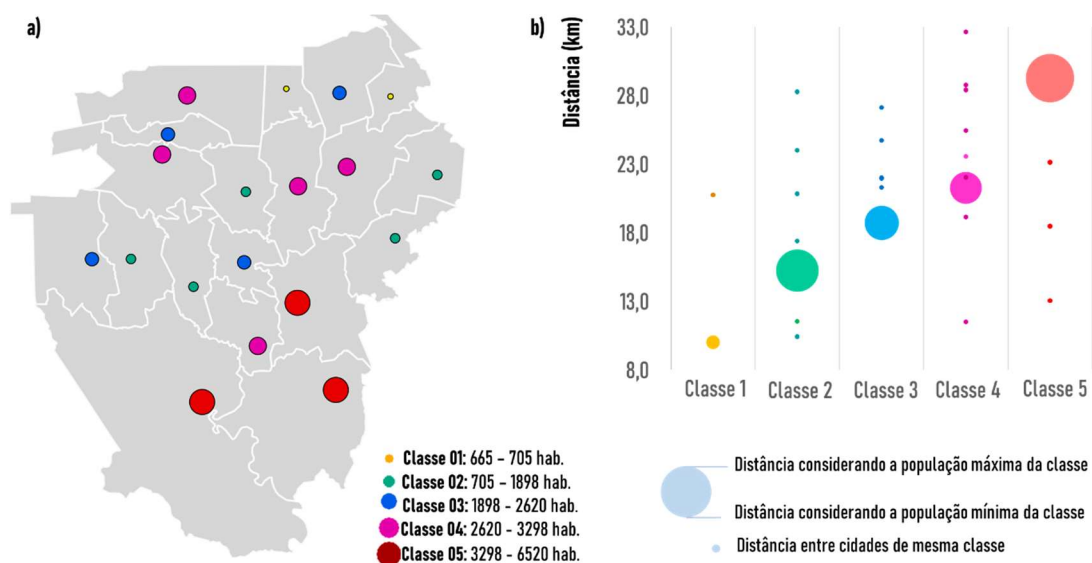


Figura 53: Distribuição dos centros urbanos, no Vale da Felicidade.
(Elaborada pela autora, 2022)

As áreas de serviço alcançadas, a partir dos pontos centrais dos CDPs, são apresentadas na Figura 54. Esse mapeamento contribui para ilustrar a acessibilidade e a área de influência de um CDP, na distância estimada pela função potencial, baseada no padrão de Alexander, considerando a rede viária como conector. As áreas de serviço mostram como tal acessibilidade varia, e como centros de cidades de mesma classe estão distribuídos e relacionados.

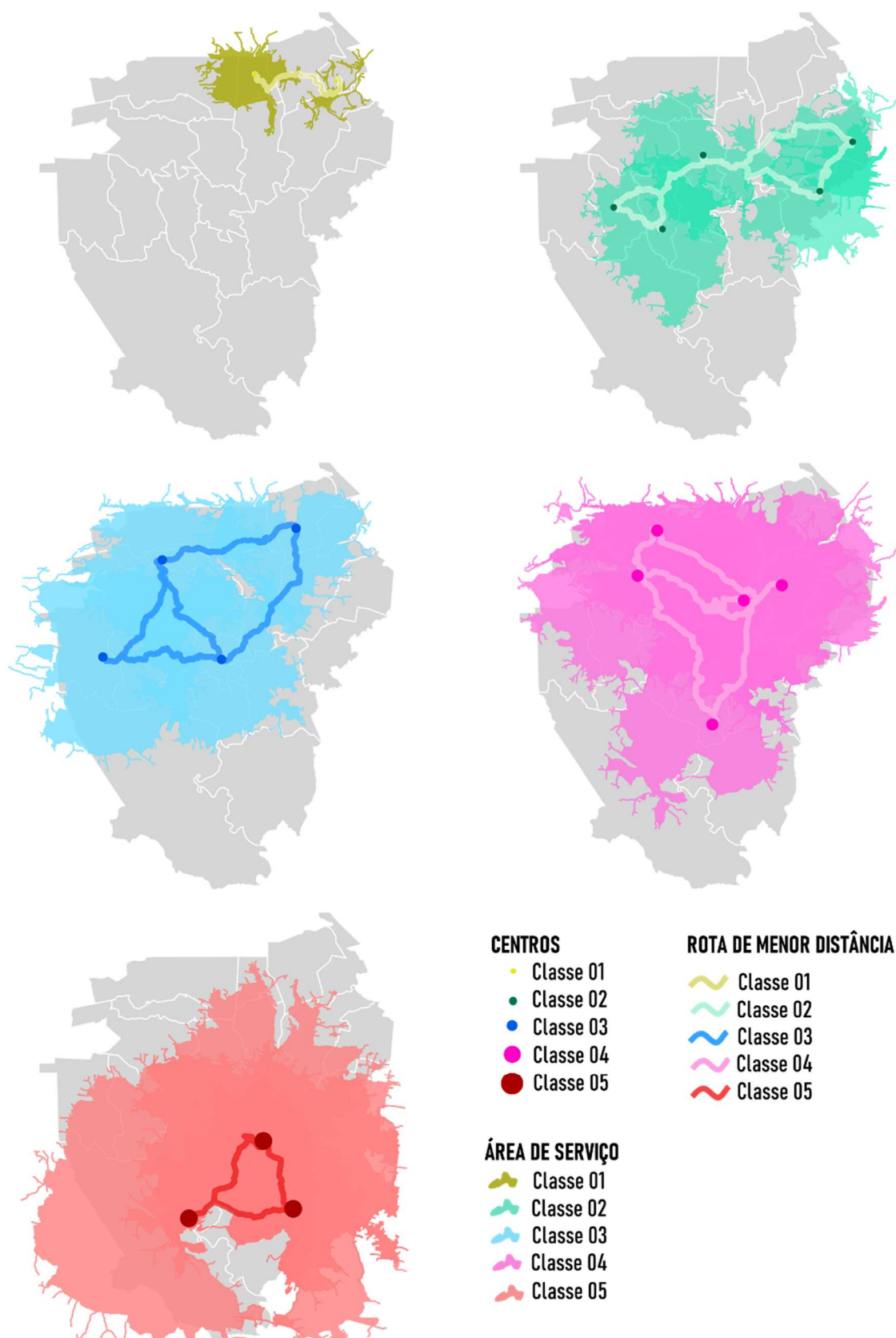


Figura 54: Distâncias existentes, a partir dos centros urbanos, considerando a rede viária e a distância estimada pelo padrão de Alexander, no Vale da Felicidade.
(Elaborada pela autora, 2022)

O padrão Distribuição das Cidades, ilustra, pois, a forma como as cidades estão distribuídas na região relativamente, em termos de escala, considerando-se, no caso do Vale da Felicidade, um conjunto de municipalidades menores e algumas cidades de maior porte. Reflete, assim, um processo indicativo de como as cidades se organizam espacialmente (BATTY; MARSHALL, 2012). Essa relação População x Distância está fortemente relacionada à área de influência das cidades, refletindo uma forma de organização, que possibilita extrair os máximos benefícios das interações.

Este é o problema geral que as cidades têm de solucionar: a estruturação do espaço e da distribuição espacial das densidades humanas ocorre de forma que os custos de funcionamento da cidade – especialmente o transporte de pessoas, mercadorias, energia e informação – sejam escalares, e o mesmo acontece com as taxas das interações sociais, enquanto preservadoras dos esforços humanos (BETTENCOURT, 2015, p. 252).

Embora a população seja um indicador importante da influência de cada centro urbano, suas funções, em termos de fornecimento de bens e serviços, também influenciarão as relações espaciais presentes em uma região. A disposição das cidades é, também, reflexo de sua articulação em uma rede complexa.

Com exceção do município de Montenegro, caracterizado como um centro sub-regional, todas as demais municipalidades são classificadas como centros locais, cuja influência é restrita aos seus limites territoriais e cujas necessidades cotidianas, de bens e serviços para a população local, são, em grande parte, supridas por outros centros.

Na Figura 55 (a), são identificadas as ligações existentes entre núcleos inseridos no Vale da Felicidade. Foram identificadas 74 ligações, das quais 40% têm origem e destino dentro da própria região de estudo. Das conexões que têm destino externo à área de estudo, 19% estão relacionadas, principalmente, ao arranjo populacional de Porto Alegre, localizada a uma distância média de 63,9 km. Por sua vez, o somatório das conexões com origem e destino internos ao Vale da Felicidade totaliza 527,2 km, com uma distância média de apenas 17,6 km, enquanto as conexões às cidades externas totalizam 2135,2 km, com uma distância média de 48,5 km. Na Figura 55 (b) é mostrada a distribuição das extensões das ligações com origem e destino internas ao Vale da Felicidade, ao passo que, na Figura 55 (c), é apresentada a distribuição das extensões das ligações com destinos externos.

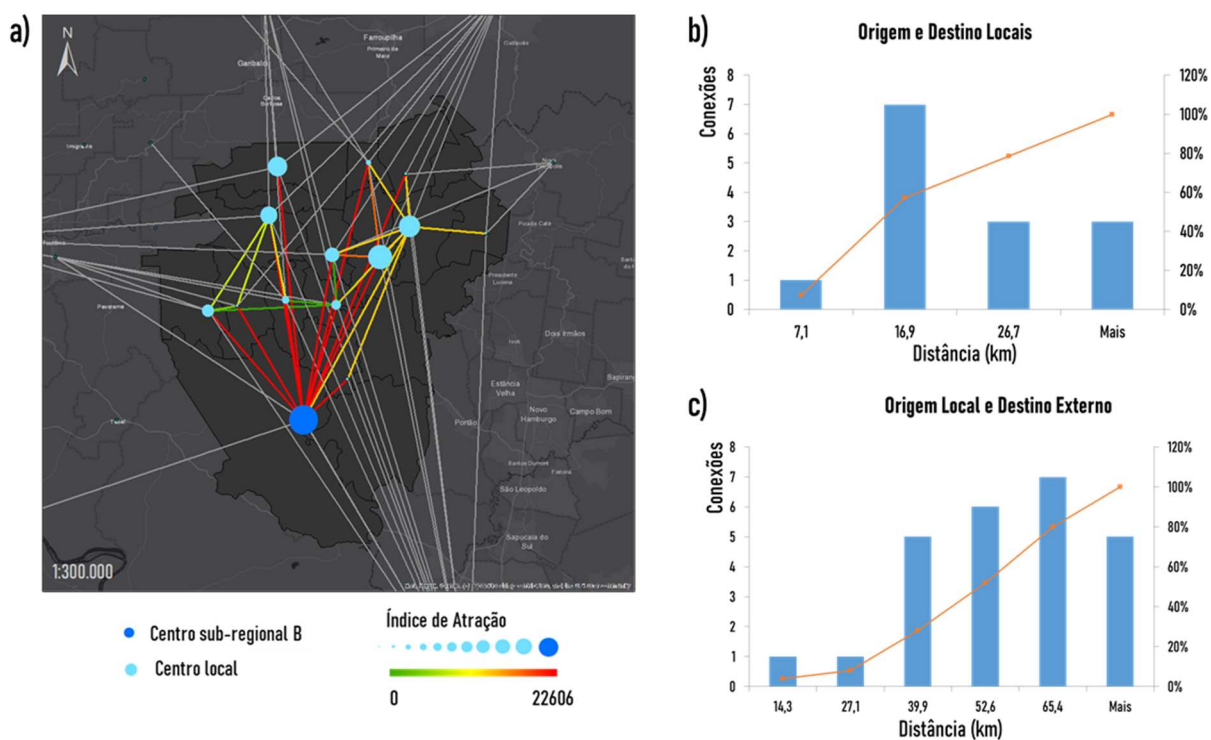


Figura 55: Rede de influência dos municípios do Vale da Felicidade: a) índice de atração de municipalidades localizadas no Vale da Felicidade, com seus respectivos destinos b) ligações com origem e destino locais e c) ligações com origem local e destinos externos. (Elaborado pela autora, com base em IBGE, 2018)

Na Figura 56, é mostrada a rede de ligações entre cidades, com origem e destino internos ao Vale da Felicidade, sendo as ligações classificadas por tipo de bem ou serviço determinante do deslocamento.

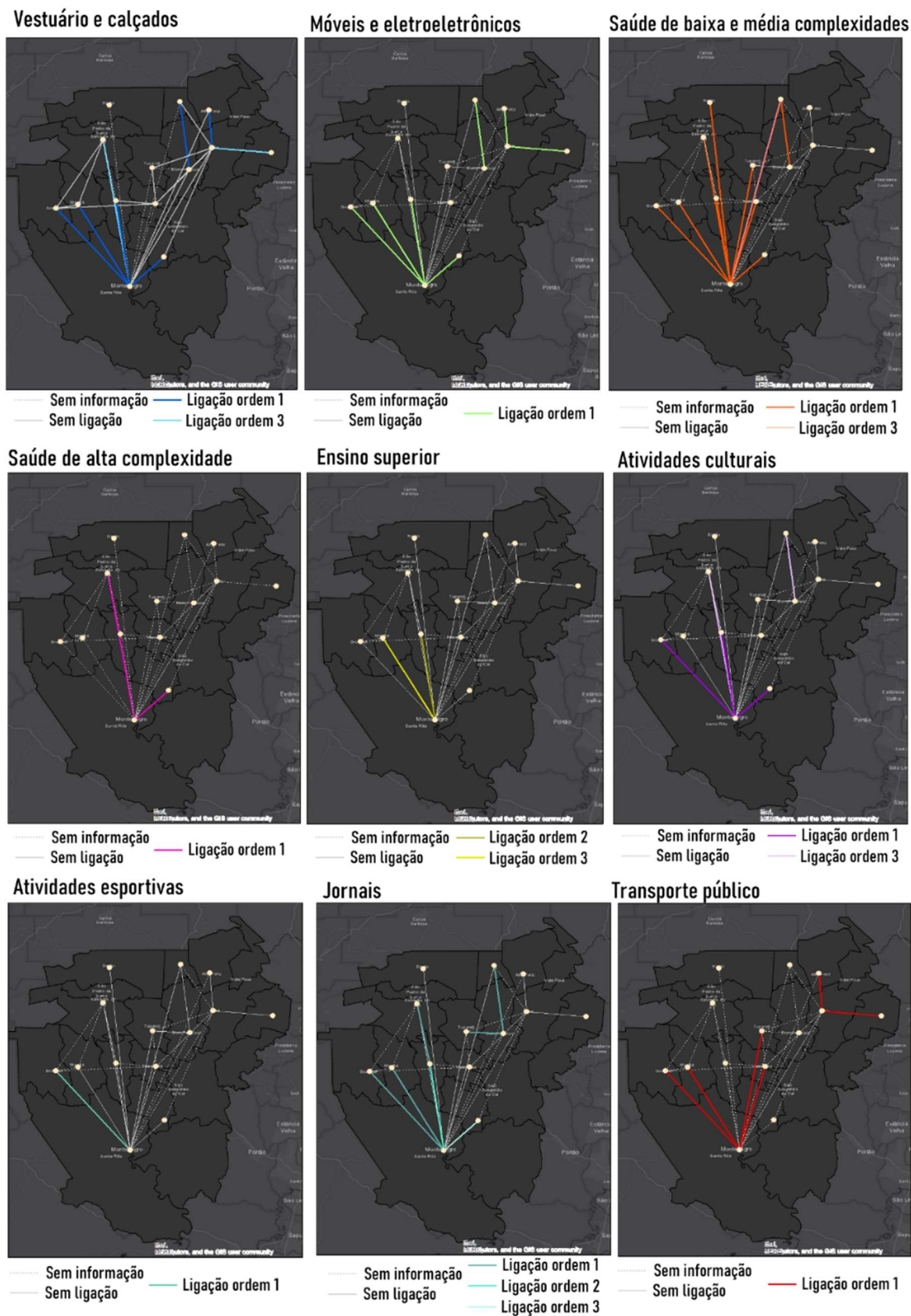


Figura 56: Distribuição das ligações com origem e destino internas ao Vale da Felicidade.
(Elaborado pela autora, com base em IBGE, 2018).

5.2 INCLUSÃO SOCIAL NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: UMA ANÁLISE SOCIOESPACIAL

A implementação de ações que conduzam a um crescimento harmônico da economia, coesão social e proteção ao meio ambiente é um dos grandes desafios da sustentabilidade urbana. De acordo com Almeida et al. (2007), a segregação urbana ocorre quando as oportunidades de acesso aos equipamentos, aos serviços e à infraestrutura urbana, bem como a exposição aos riscos relacionados à violência, aos desastres naturais e à saúde, ocorrem de forma desigual para diferentes grupos. Como destaca Soja (2009), em uma sociedade socialmente segregada, o espaço atua como instrumento de separação social.

A segregação socioespacial pode ser mais claramente identificada quando são analisadas a sua localização e o seu tamanho. Tal segregação pode ser identificada como decorrente da divisão do espaço urbano e das formas de sua ocorrência, que resultam em grupos de incluídos e excluídos. A existência de tais áreas de segregação socioespacial é um indicativo de que a arquitetura urbana pode constituir um dos fatores determinantes da ocorrência de locais com tais características, e que podem ser previamente estabelecidos como conduzindo a uma condição de desigual apropriação (CANETTIERI et al., 2014).

Já, a ênfase na causalidade espacial, pode auxiliar a explorar e a melhor entender uma série de fenômenos associados à constituição das aglomerações urbanas, seja: no comportamento cotidiano; em processos como inovação tecnológica, criatividade artística, desenvolvimento econômico, mudança social; ou no estudo de fenômenos associados à degradação ambiental, à polarização social e, mais especificamente, à produção de justiça e injustiça social.

Desta forma, um dos principais contribuintes para a complexidade de estudos urbanos é sua componente social, muitas vezes negligenciada em abordagens sobre o ambiente das cidades. Soja (2009) destaca que pensar o espaço urbano sob o viés de justiça, não se constitui, tão somente em um enfoque contribuinte para uma melhor compreensão teórica, mas pode, também, evidenciar oportunidades de ações mais eficazes.

Metodologias que permitam mensurar desigualdades são fundamentais para a identificação mais assertiva dos problemas reais existentes nas cidades. Neste sentido, considerando a forte relação territorial dos fenômenos relacionados à segregação urbana, é de máxima relevância que tais metodologias possibilitem uma avaliação espacializada. No contexto nacional, o *Mapa*

da Exclusão/Inclusão Social de São Paulo representa a primeira iniciativa nesse sentido. Proposta por Sposati (1996), a metodologia objetiva uma análise espacial da incidência de desigualdades intraurbanas.

O mapa [...] foi elaborado para que os habitantes de São Paulo, olhando essa imagem paradoxal de sua metrópole, refletida dos mapas e tabelas como num espelho, alimentem a vontade de transformá-la. Para isso, o Mapa procura estabelecer novas relações entre os dados da cidade, de modo a tornar possível uma nova percepção sobre as condições de vida da população das várias regiões (SPOSATI, 1996, p. 7).

Considerada um instrumento de difusão de padrões básicos de inclusão social, a metodologia proposta pelo estudo tem, como base, informações dos Censos Demográficos, complementadas por dados que podem acessados junto ao Poder Executivo das municipalidades.

Devido à sua flexibilidade e replicabilidade, a metodologia é passível de ser adaptada para contextos diversos, nos quais possa ser requerida uma maior generalização ou, se possível, um maior nível de detalhamento, a depender das camadas de informação disponíveis. Desta maneira, o estudo inspirou o desenvolvimento de outras análises na mesma direção, orientadas a outras municipalidades, como, por exemplo, a elaboração do *Mapa da Inclusão e Exclusão Social de Porto Alegre* (PORTO ALEGRE, 2004), que, por sua vez, procurou esboçar a configuração da estrutura social, considerando dois índices sintéticos: o Índice de Condições de Vida e o Índice de Vulnerabilidade Social.

Contudo, ainda são escassos, no contexto latino-americano, os estudos que utilizam indicadores espaciais como ferramenta para análise do nível de segregação urbana. Em geral, são utilizados indicadores simplificados, que não consideram a complexidade associada a este tipo de avaliação. Constata-se, pois, a importância da disponibilidade de ferramentas que possibilitem a realização de análises multiescalares, e que contemplem o caráter essencialmente espacial dos fenômenos urbanos (ALMEIDA et al., 2007).

5.2.1 A heterotopia da inclusão social

Conforme destaca Lefebvre (2008), a contextualização das formas, funções, estruturas e processos da cidade, é necessária à reflexão teórica sobre o meio urbano. Compreender tais instâncias espaciais é, como ressaltam Canetti et al. (2014), uma forma de definir o que é encontrado na realidade, abarcando, inclusive, a complexidade de sua produção social. Nesse

contexto, o conceito de heterotopia, elaborado por Michel Foucault, pode ser empregado na descrição de espaços com múltiplas camadas de significação:

Primeiramente, há as utopias. Essas são as alocações sem lugar real. [...] essas utopias são espaços fundamentalmente, essencialmente, irrealis. Há, igualmente – e isso provavelmente em toda cultura, em toda civilização – lugares reais, lugares efetivos, lugares que são desenhados na própria instituição da sociedade e que são espécies de contra alocações, espécies de utopias efetivamente realizadas, nas quais as alocações reais [...] são simultaneamente representadas, contestadas e invertidas [...] Denominarei tais lugares, por oposição às utopias, de heterotopias (FOUCAULT, 2013, p. 115-116)

Na metodologia originalmente proposta por Sposati (1996), o mapeamento das múltiplas dimensões da exclusão e inclusão social tem, como base, o conceito da heterotopia, que considera quatro utopias de inclusão social: autonomia, qualidade de vida, desenvolvimento humano e equidade.

No domínio do Mapa da Exclusão/Inclusão Social, a utopia da **autonomia** é compreendida como “a capacidade e a possibilidade do cidadão em suprir suas necessidades vitais, especiais, culturais, políticas e sociais, sob as condições de respeito às ideias individuais e coletivas” (GENOVEZ, 2002, p. 42). A ideia de **qualidade de vida** é entendida como a ocorrência de uma melhor redistribuição – e usufruto – da riqueza social e tecnológica. A **qualidade de vida** pressupõe, ainda, a garantia de um ambiente de desenvolvimento ecológico e participativo, com reduzidos graus de degradação e precariedade. A utopia de **desenvolvimento humano**, pressupõe a possibilidade de todos os cidadãos poderem usufruir, coletivamente, do mais alto grau de capacidade humana, com o menor grau possível de privação e de sofrimento. A utopia da **equidade** é entendida como a possibilidade de manifestação das diferenças, sem discriminação, em relação às diversidades de gênero, políticas, étnicas, religiosas, entre outras (GENOVEZ, 2002).

Reconhece-se que estas dimensões utópicas não podem ser representadas ou mapeadas, integralmente, por indicadores e índices matemáticos: sua discussão e compreensão são mais amplas e profundas. O que é proposto, entretanto, é uma análise de *proxys* de cada uma dessas utopias, baseada em variáveis passíveis de quantificação e espacialização, com os dados disponíveis. Dessa maneira, a representação dessas utopias, que compõem a heterotopia da inclusão social, é realizada por meio de índices simples e/ou compostos, que foram inspirados nos resultados dos trabalhos de Sposati (1996) e Genovez (2002).

Nessa direção, a presente seção é dedicada à análise de indicadores socioespaciais de segregação urbana. Busca-se incorporar às metodologias tradicionais de avaliação espacial elementos que contribuam para a representação da natureza complexa dos fenômenos socioespaciais.

5.2.2 Detalhamento da metodologia

5.2.2.1 Mapa da Inclusão/Exclusão Social

Para a elaboração do Mapa da Inclusão/Exclusão Social do Vale da Felicidade, foram utilizados os quatro índices, representativos das utopias de inclusão social, acima referidos: o índice de autonomia de renda; de qualidade de vida; de desenvolvimento humano; e de equidade. Para tal fim, índices simples e compostos foram obtidos, exclusivamente, a partir de variáveis contempladas no universo do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Na Figura 57, são caracterizados os índices que compõem o **Índice de Inclusão/Exclusão Social (IEX)**.

Os índices que possuem valores considerados como um Padrão de Referência de Inclusão (PRI), estão destacados em cor laranja claro, na Figura 57. Os índices que identificam características de inclusão ou exclusão, que se intensificam com o aumento do módulo de seus valores, estão indicados, apenas nas cores rosa – quando representativos de situações de exclusão – ou verde – quando representativos de situações de inclusão.

Dimensão da Inclusão/Exclusão Social	Indicador de Exclusão	Padrão de Referência de Inclusão	Indicador de Inclusão
Autonomia de Renda	Renda do responsável pelo domicílio		
	Responsáveis sem renda; responsáveis com renda até 1 salário mínimo.	Responsáveis com renda entre 1 e 3 salários mínimos.	Responsáveis com renda superior a 3 salários mínimos.
Qualidade de Vida	Conforto Domiciliar		
	Domicílios com mais de 4 moradores.	Domicílio com 4 moradores.	Domicílios com menos de 4 moradores.
	Domicílios sem banheiro.		
	Qualidade Ambiental		
	Conexão à rede de abastecimento de água, acesso a poço/nascente ou coleta de água da chuva; coleta de lixo; conexão à rede de esgoto ou fossa séptica.		
Desenvolvimento Humano	Moradias Improvisadas		
	Moradias improvisadas.		
Desenvolvimento Humano	Alfabetização		
	Responsáveis não alfabetizados; pessoas entre 10 e 14 anos não alfabetizadas.	Pessoas entre 5 e 9 anos alfabetizadas.	
	Longevidade		
Equidade	Pessoas com 70 anos ou mais.		
	Equidade de Gênero quanto ao Rendimento		
	Relação entre os rendimentos médios de homens e mulheres responsáveis >1	Relação entre os rendimentos médios de homens e mulheres responsáveis = 1	Relação entre os rendimentos médios de homens e mulheres responsáveis < 1
	Equidade de Gênero quanto à Alfabetização dos Responsáveis		
	Relação entre a proporção de homens e a proporção de mulheres responsáveis alfabetizados >1	Relação entre a proporção de homens e a proporção de mulheres responsáveis alfabetizados = 1	Relação entre a proporção de homens e a proporção de mulheres responsáveis alfabetizados < 1

Figura 57: Índices componentes do IEX.
(Elaborada pela autora, 2022)

Para a representação dos índices em escalas que possibilitem a percepção espacial da relação exclusão/inclusão social, foram realizadas normalizações, conforme proposto por Genovez (2002). A unidade de espacialização da informação foi o setor censitário. Os CDPs (obtidos na seção 5.1), foram utilizados como delimitadores da área de análise, uma vez que indicam as áreas com maior ocupação do território e incluem o núcleo da distribuição de densidades de cada município.

Inicialmente, foi considerada a diferença entre os valores numéricos associados das variáveis de inclusão e de exclusão. Dessa diferença, os índices positivos são calculados por meio da Equação 4; e os índices negativos, são calculados utilizando a Equação 5. A Figura 58 ilustra o procedimento descrito.

$$\text{Índice}_{\text{Inclusão}} = \frac{V_{\text{observado}}}{V_{\text{máximo}}} \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{Índice}_{\text{Exclusão}} = \frac{V_{\text{observado}}}{|V_{\text{mínimo}}|} \quad \text{Equação 5}$$

onde, $V_{\text{observado}}$ é o valor do índice associado a uma determinada localidade, no setor censitário desta localidade; $V_{\text{mínimo}}$ é o valor mínimo do índice observado, em todos os setores censitários; e $V_{\text{máximo}}$ é o valor máximo do índice observado, em todos os setores censitários.

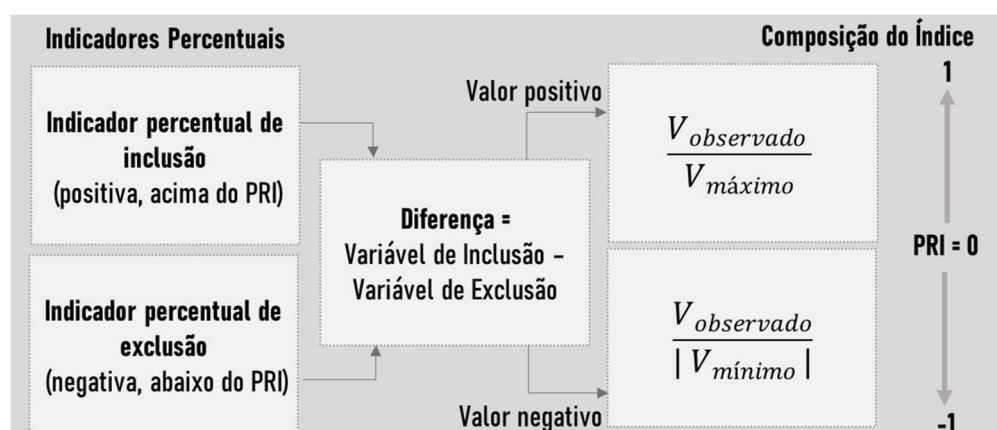


Figura 58: Normalização dos índices de inclusão e exclusão social.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em Genovez, 2002)

No APÊNDICE A, são apresentadas todas as variáveis utilizadas para o cálculo dos índices que compõem o IEX, bem como é realizada a identificação de cada uma delas, tal como são apresentadas nas planilhas do Censo Demográfico 2010. A seguir, serão apresentadas as equações utilizadas para a obtenção de cada índice:

- **Autonomia de Renda:** foi considerado como Padrão de Referência de Inclusão (PRI), aquela condição em que os responsáveis pelos domicílios possuem renda entre 1 e 3 salários mínimos. O **índice de inclusão** é definido como: **a proporção de responsáveis**

por domicílios cuja renda é superior 3 salários mínimos (Equação 6). O índice de exclusão é definido como: a proporção de responsáveis por domicílios cuja renda é inferior a 1 salário mínimo (Equação 7). O Índice de Autonomia de Renda (IAR) é expresso pela Equação 8, e normalizado de acordo com o procedimento ilustrado, de forma sintética, na Figura 58.

$$Renda_{inclus\tilde{a}o} = \frac{Renda_{3a5} + Renda_{5a10} + Renda_{10a15} + Renda_{15a20} + Renda_{>20}}{TotalDomic\tilde{l}ios} \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 6}$$

$$Renda_{exclus\tilde{a}o} = \frac{Renda_0 + Renda_{<0,5} + Renda_{0,5a1}}{TotalDomic\tilde{l}ios} \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 7}$$

$$IAR = Renda_{inclus\tilde{a}o} - Renda_{exclus\tilde{a}o} \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 8}$$

- **Qualidade de Vida:** na dimensão da qualidade de vida, foram considerados componentes relacionadas ao conforto habitacional, à qualidade ambiental e à existência de moradias improvisadas.
 - **Conforto Habitacional:** determinado pela composição do indicador de densidade habitacional (variável identificada por *DensHabitacional*, ver APÊNDICE A), cujo PRI foi considerado como sendo de 4 habitantes por moradia, e pelo índice de conforto sanitário, sendo este um indicador de exclusão que caracteriza a proporção de domicílios sem banheiro (Equação 9).

$$ConfortoSanit\tilde{a}rio = \frac{SemBanheiros}{TotalDomic\tilde{l}ios} \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 9}$$

- **Qualidade Ambiental:** o índice de inclusão é determinado pela proporção de: domicílios com ligação à rede de abastecimento de água, ou abastecidos por poços ou nascentes, ou, ainda, com captação das águas pluviais (Equação 10); de domicílios contemplados com coleta de lixo (Equação 11); e pela proporção de domicílios que dispõem de ligação à rede de esgotamento sanitário ou a fossas sépticas (Equação 12).

$$PropAbastecimento = \frac{\acute{A}gua_{Rede} + \acute{A}gua_{Po\~{c}o/Nascente} + \acute{A}gua_{Pluvial}}{TotalDomic\tilde{l}ios} \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 10}$$

$$\text{PropColetaResíduos} = \frac{\text{ColetaResíduos}}{\text{TotalDomicílios}} \quad \text{Equação 11}$$

$$\text{PropEsgotamento} = \frac{\text{Esgoto}_{\text{Rede}} + \text{Esgoto}_{\text{FossaSéptica}}}{\text{TotalDomicílios}} \quad \text{Equação 12}$$

- **Moradias improvisadas:** proporção de moradias improvisadas existentes no setor censitário, obtida pela Equação 13.

$$\text{PropMorImprov} = \frac{\text{MorImprov}}{\text{TotalDomicílios}} \quad \text{Equação 13}$$

O **Índice de Qualidade de Vida (IQV)** é calculado conforme a Equação 14, e, em seguida, normalizado, conforme procedimento apresentado na Figura 58:

$$\begin{aligned} \text{IQV} = & (\text{PropAbastecimento} + \text{PropColetaResíduos} + \text{PropEsgotamento} \\ & + \text{DensHabitacional}_{<4\text{hab/domicílio}}) - (\text{ConfortoSanitário} \\ & + \text{PropMorImprov} + \text{DensHabitacional}_{>4\text{hab/domicílio}}) \end{aligned} \quad \text{Equação 14}$$

- **Desenvolvimento Humano:** é expresso pelas componentes relacionadas aos índices de alfabetização e longevidade da população.
 - **Alfabetização:** para caracterizar o indicador de exclusão, são consideradas as proporções de responsáveis por domicílios que não sejam alfabetizados (Equação 15) e de pessoas no domicílio, com idade entre 10 e 14 anos, não alfabetizadas (Equação 16). Como indicador de inclusão, é considerada a proporção de pessoas alfabetizadas, entre 5 e 9 anos (Equação 17).

$$\text{RespNãoAlfa} = 1 - \frac{\text{RespAlfa}}{\text{TotalResp}} \quad \text{Equação 15}$$

$$\text{Pess}_{10a14} \text{ NãoAlfa} = 1 - \frac{\text{PessAlfa}_{\text{entre10e14anos}}}{\text{Pess}_{\text{entre10e14anos}}} \quad \text{Equação 16}$$

$$\text{Pess}_{5a9} \text{ Alfa} = \frac{\text{PessAlfa}_{\text{entre5e9anos}}}{\text{Pess}_{\text{entre5e9anos}}} \quad \text{Equação 17}$$

- **Longevidade:** como indicador de inclusão, a longevidade é expressa pela proporção de pessoas com mais de 70 anos (Equação 18).

$$Pess_{>70anos} = \frac{Pess_{\geq 70anos}}{TotalPessoas} \quad \text{Equação 18}$$

O **Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)**¹⁶ é expresso pela Equação 19, sendo normalizado conforme procedimento apresentado na Figura 58:

$$IDH = (Pess_{5a9}Alfa + Pess_{>70anos}) - (RespN\tilde{a}oAlfa + Pess_{10a14}N\tilde{a}oAlfa) \quad \text{Equação 19}$$

- **Equidade:** o índice é composto pela relação entre os rendimentos médios de homens e de mulheres responsáveis por domicílios (Equação 20); e pela relação entre a taxa de alfabetização de homens e de mulheres responsáveis por domicílios (Equação 21).

$$PropRendaResp = \frac{\frac{RendaRespHomens}{RespHomens}}{\frac{RendaRespMulheres}{RespMulheres}} \quad \text{Equação 20}$$

$$PropAlfabetizados = \frac{\frac{HomensAlfa}{TotalHomens}}{\frac{MulheresAlfa}{TotalMulheres}} \quad \text{Equação 21}$$

Cabe destacar que os índices componentes do Índice de Equidade (IEQ) não são proporções diretas, mas **relações entre proporções**. Desta forma, ambos os índices foram normalizados, conforme procedimento apresentado na Figura 58. O valor do Padrão de Referência de Inclusão (PRI) considerado foi de 1, representativo das situações em que, tanto o índice de alfabetização, quanto a renda média de homens e mulheres, são iguais. Os índices foram, então, somados para a obtenção do IEQ (Equação 22). O Índice de Equidade (IEQ) foi reescalado entre -1 e 1, sendo o valor do PRI representado como 0, na escala adotada.

$$IEQ = PropAlfabetizadosNORM + PropRendaRespNORM \quad \text{Equação 22}$$

O Índice de Inclusão/Exclusão Social (IEX) é expresso pela Equação 23, e normalizado de acordo com o procedimento supramencionado, considerando o PRI como tendo o valor 0.

¹⁶ Cabe destacar que o índice é homônimo ao já difundido Índice de Desenvolvimento Humano, proposto pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Seu cálculo, entretanto, considera parâmetros diferentes, como é possível observar na Figura 57.

$$IEX = IAR + IQV + IDH + IEQ$$

5.2.2.2 Identificação de Padrões Locais

Para a identificação de padrões espaciais locais, foi utilizado o **Índice Local de Moran**, expresso pela Equação 24 (ANSELIN, 1995; CÂMARA; CORREA, 2004). O índice é calculado para cada setor censitário (i), permitindo a identificação de agrupamentos locais significativamente diferente dos demais.

$$I_i = \frac{z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n z_j^2} \quad \text{Equação 24}$$

onde, I_i é o Índice Local de Moran; z_i é a diferença entre o Índice de Inclusão/Exclusão Social (IEX), no setor i , e o valor médio do IEX; z_j é a diferença entre o IEX, no setor j , e o valor médio do IEX; e w_{ij} é o peso ou grau de conectividade espacial entre os setores i e j , conforme a relação topológica estabelecida entre eles.

A relação estabelecida entre os setores i e j , foi a de compartilhamento de um limite ou nó. Quando atendida essa relação espacial, entende-se que os setores vizinhos (z_j) influenciarão as características do polígono alvo (z_i), e, desta forma, os valores a eles associado serão considerados no cálculo de I_i .

Um valor positivo de I_i , na Equação 24, indica que os valores do IEX, dos setores censitários vizinhos ao polígono alvo z_i , são igualmente altos ou baixos: esta é a característica de um agrupamento espacial, ou *cluster*, de inclusão ou exclusão. Um valor negativo de I_i , indica que o setor apresenta um valor de IEX significativamente diferente daquele observado nos setores vizinhos: esta é a característica de um *outlier*, no qual é identificada uma dissimilaridade mais pronunciada do que a tendência global.

Para que seja identificado um *cluster* ou *outlier*, a relação estabelecida entre os setores, e evidenciada pelos resultados da Equação 24, deve ser estatisticamente significativa. Sendo obtido um nível de confiança de 95%, será possível afirmar que o padrão espacial identificado é, de fato, estruturado, e não o resultado de processos espaciais aleatórios.

5.2.3 Análise dos Padrões de Inclusão Socioespacial

5.2.3.1 Mapa da Inclusão/Exclusão Social

A distribuição dos indicadores de inclusão e de exclusão e dos componentes dos índices estudados está apresentada na Figura 59.

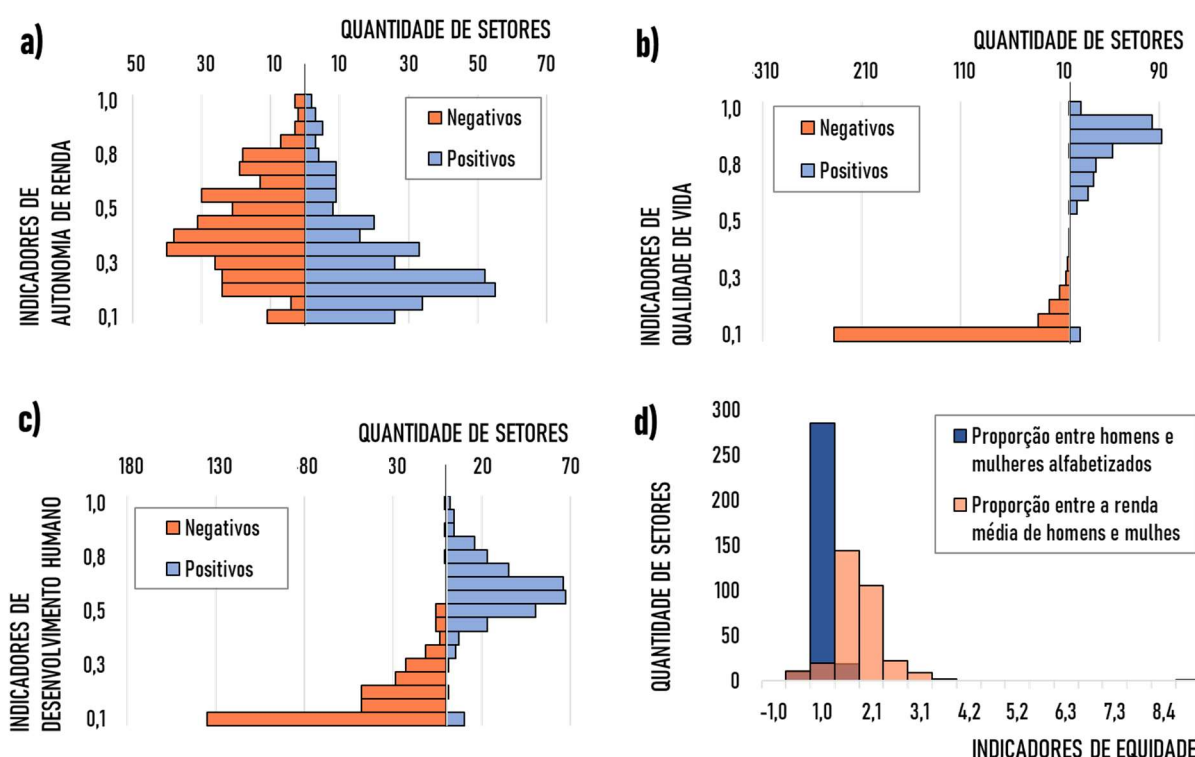


Figura 59: Distribuição dos indicadores positivos e negativos componentes do: a) Índice de Autonomia de Renda (IAR); b) Índice de Qualidade de Vida (IQV); c) Índice de Desenvolvimento Humano (IDH); e d) Índice de Equidade (IEQ). (Elaborada pela autora, 2022)

Os indicadores que compõem o Índice de Autonomia de Renda (Figura 59a) apresentam uma ampla variação em seus valores, o que identifica uma possível disparidade entre as condições dos habitantes, em termos de sua capacidade de suprir suas necessidades, em termos de infraestrutura, de habitação e de consumo, por exemplo. No tocante ao Índice de Qualidade de Vida (Figura 59b) e ao Índice de Desenvolvimento Humano (Figura 59c), os dados apresentam

uma distribuição similar: as porcentagens indicativas de inclusão (p.e., taxa de alfabetização e indicadores de saneamento básico) são relativamente altas, no conjunto de setores analisados; já, os índices que expressam situações de exclusão (p.e., taxa de moradias improvisadas e taxa de pessoas analfabetas) são modularmente baixos; logo, próximos ao PRI.

Com relação aos indicadores que integram o Índice de Equidade, representados na Figura 59d, a assimetria do histograma, à direita, indica uma tendência maior de mulheres, líderes de família, serem alfabetizadas, como constatado em 55% dos setores. Quando analisada a renda dos responsáveis por domicílios, a renda dos homens é superior à das mulheres, em 91% dos setores. Nesse contexto, embora as tendências avaliadas possam revelar inequidades de gênero na região, é importante destacar que também é possível observar, na maioria dos setores censitários, indicadores próximos ao PRI, o que expressa uma situação favorável em termos de equidade de gênero: o indicador de alfabetização, por gênero, apresenta média de 0,04 e desvio padrão de 0,22; e o indicador de renda, média de -0,07 e desvio padrão de 0,11.

Na Figura 60, abaixo, é apresentado o mapa do Índice de Autonomia de Renda, o qual apresenta, na área de estudo, valor médio de -0,13 e um desvio padrão de 0,42. Assim, é possível observar que, de uma forma geral, os setores apresentam índices próximos ao Padrão de Referência de Inclusão (PRI), observando setores com autonomia de renda positiva, nos municípios de Montenegro e Feliz. Em Montenegro, verifica-se uma clara disparidade entre um núcleo de setores incluídos e uma periferia com valores indicativos de exclusão. Em Feliz, observa-se, no tocante ao Índice de Autonomia de Renda, uma baixa dispersão de valores, que se apresentam, ou positivos, ou muito próximos ao PRI.

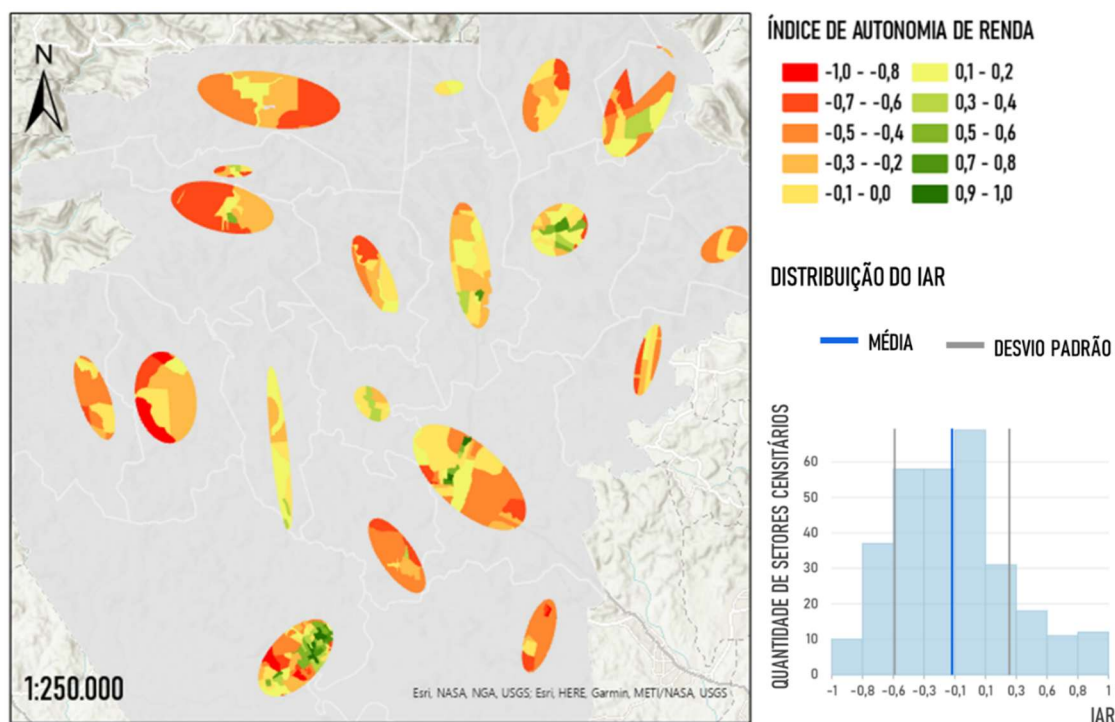


Figura 60: Mapa do Índice de Autonomia de Renda.
(Elaborada pela autora, 2022)

A distribuição espacial do Índice de Qualidade de Vida, conforme ilustrado na Figura 61, apresenta altos valores, em toda a área de estudo: o valor mínimo do índice foi de 0,00; seu valor médio foi de 0,78; e o desvio padrão, de 0,17, o que é indicativo da uniformidade das boas condições de vida observadas na região. Entretanto, o índice não apresenta um padrão de distribuição espacial claramente identificável, observando-se características de inclusão, em termos dos indicadores analisados, em toda a área de estudo.

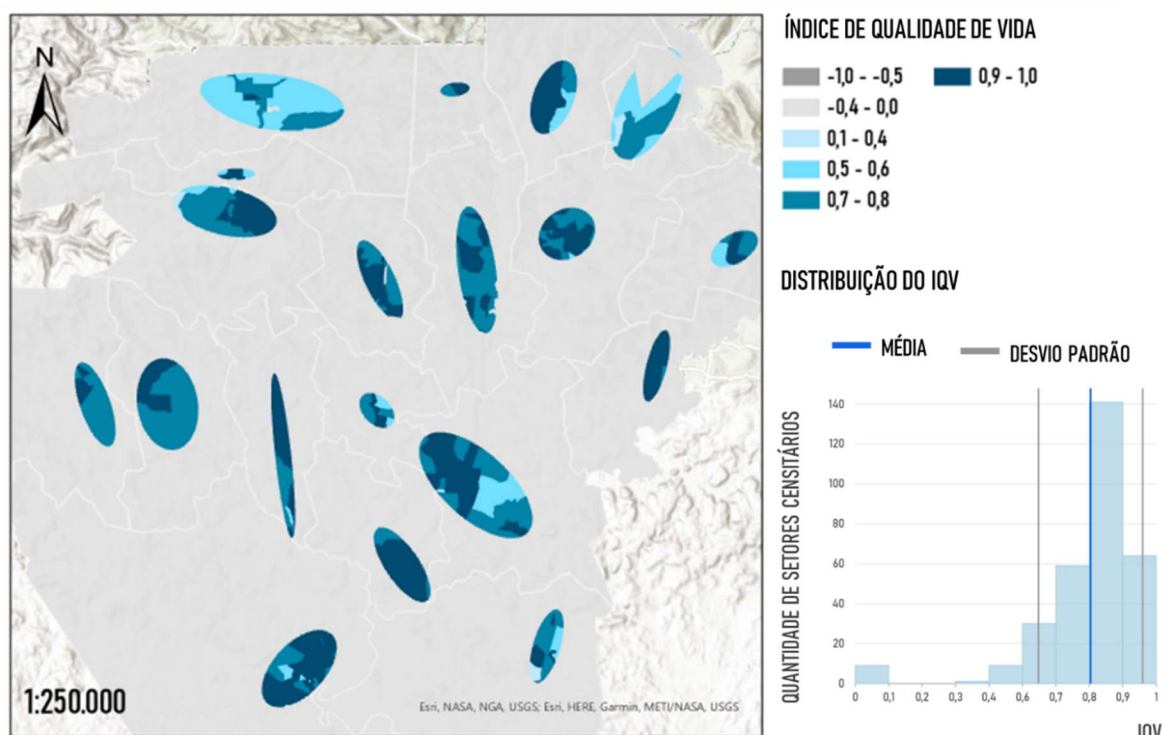


Figura 61: Mapa do Índice de Qualidade de Vida.
(Elaborada pela autora, 2022)

A Figura 62 ilustra a distribuição espacial do Índice de Desenvolvimento Humano, o qual apresenta valor médio de 0,48 e desvio padrão de 0,24. Logo, é possível perceber que as características de inclusão na área de estudo também podem ser identificadas como ocorrentes em relação aos indicadores de desenvolvimento humano, pois são observados altos índices, com pouca variabilidade, à exceção de um setor, no município de Vale Real. Nessa zona específica, o baixo indicador de longevidade, associado a uma maior incidência de responsáveis por domicílio que não são alfabetizados, em relação aos resultados da região, fazem do setor um *outlier*, em termos do IDH.

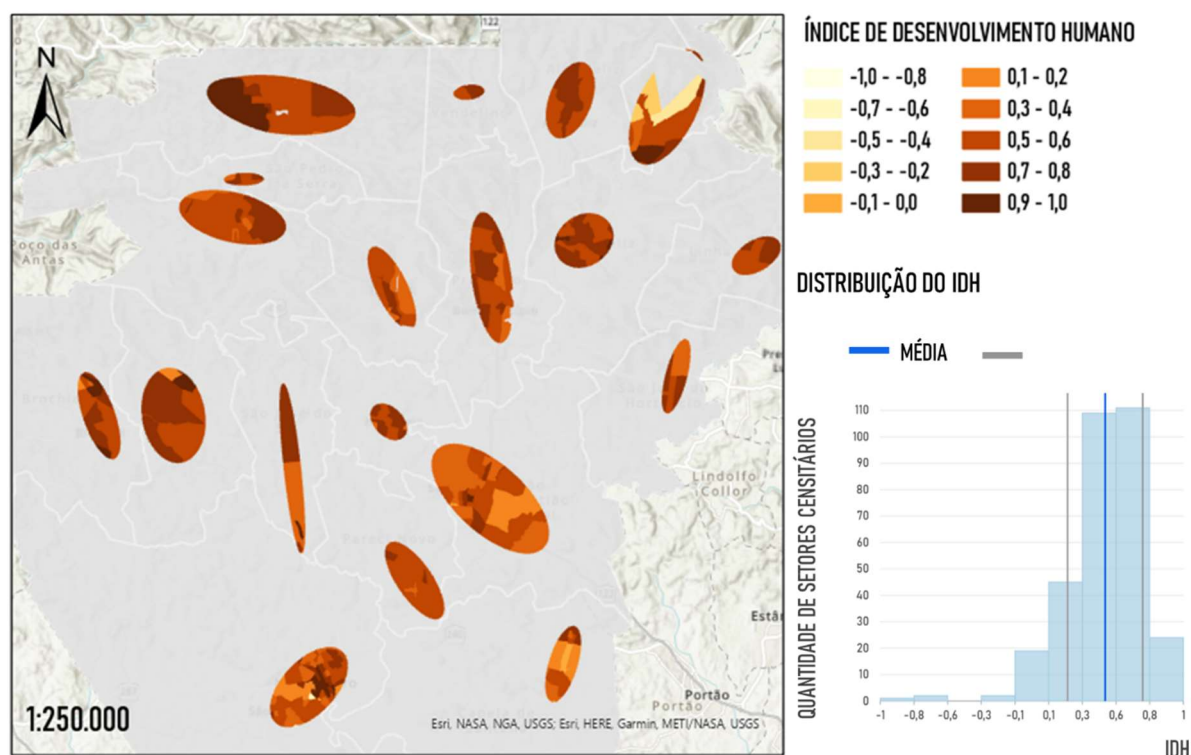


Figura 62: Mapa do Índice de Qualidade de Vida.
(Elaborada pela autora, 2022)

A distribuição espacial do Índice de Equidade, nos setores analisados, é ilustrada na Figura 63. Esse índice apresentou valor médio de -0,22, com desvio padrão de 0,31. Os valores, em geral próximos ao PRI, indicam que a equidade de gênero – quanto à alfabetização e à renda dos responsáveis pelos domicílios – pode ser verificada em toda a área de estudo. Dessa forma, esse cenário é favorável à manifestação das diferenças, sem discriminação, uma vez que se trata de uma característica importante dos sistemas vivos, expressa pela existência de contrastes (aqui representadas por diferenças de gênero), os quais, nesse contexto, não geram segregação.

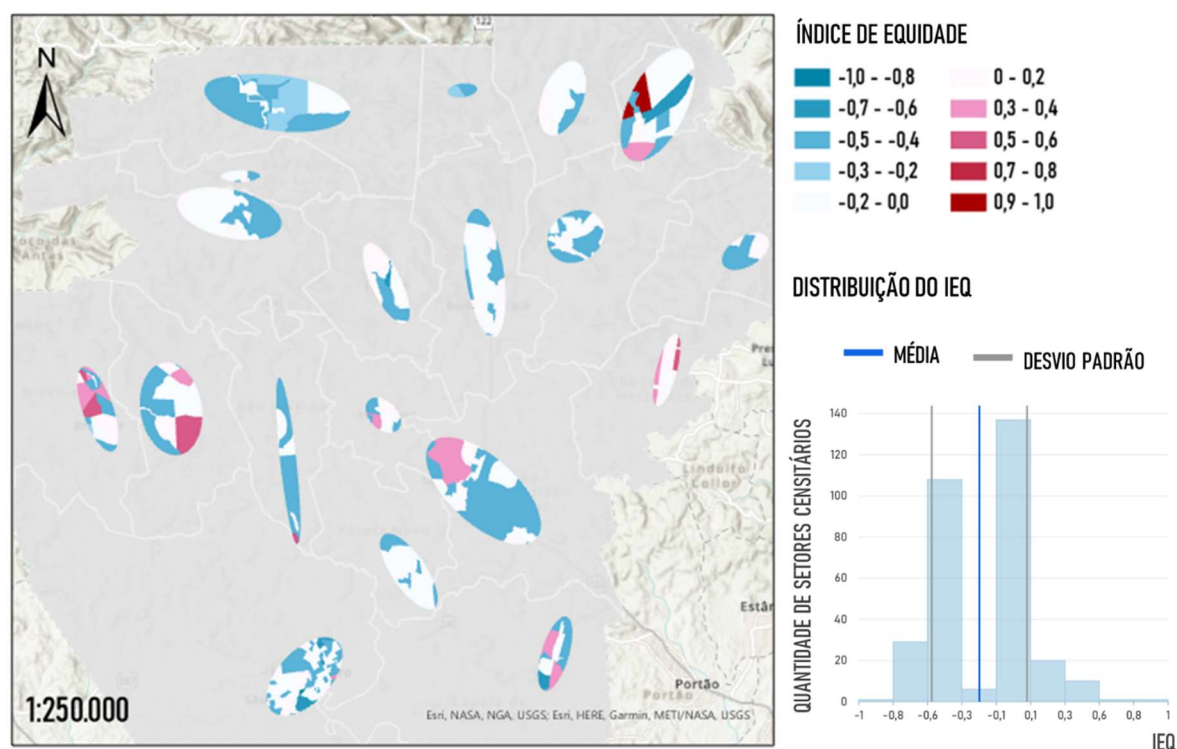


Figura 63: Mapa do Índice de Equidade.
(Elaborada pela autora, 2022)

O mapa da Inclusão/Exclusão Social (IEX) é apresentado na Figura 64, sendo possível observar a predominância dos índices positivos, indicativos da situação de inclusão, em que o IEX apresenta valor médio de 0,33 e desvio padrão de 0,26. Os valores negativos são identificados apenas em 7% dos setores avaliados, dos quais, estatisticamente, 18,2% podem ser considerados outliers, na escala de análise regional.

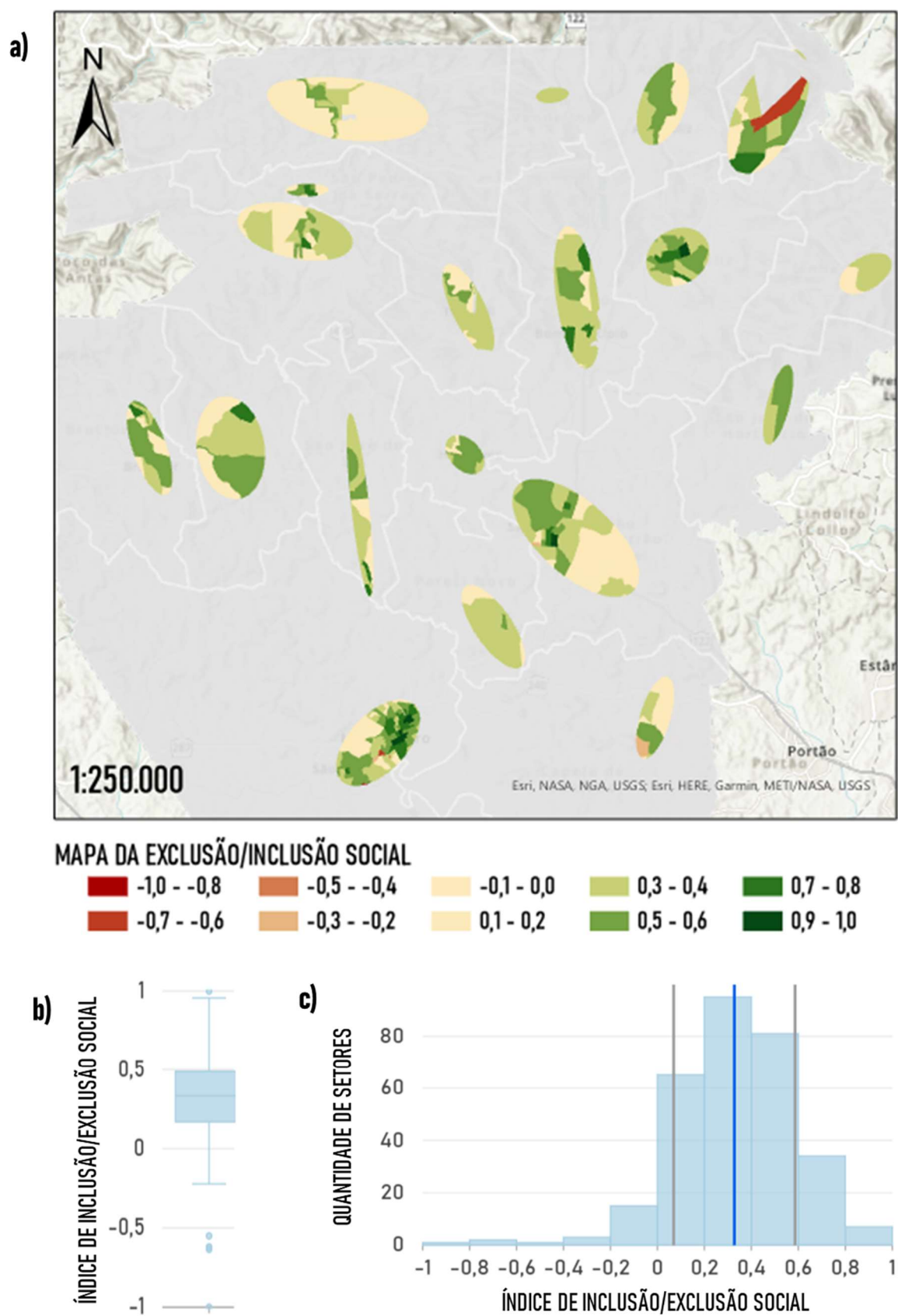


Figura 64: a) Mapa da Inclusão/Exclusão Social; b) *boxplot* do IEX; e c) histograma de distribuição dos IEX.
(Elaborada pela autora, 2022)

5.2.3.2 Identificação de Padrões Locais

No que concerne a condições de **inclusão**, foi observado que, na área de estudo, de modo geral, tais condições são atendidas. Entretanto, alguns padrões, em localidades específicas, podem divergir dessa tendência espacial global, sendo observados valores do IEX diferentes daqueles estatisticamente esperados. Os *clusters* e o *outliers* locais, de inclusão/exclusão social, podem ser identificados na Figura 65. Os *clusters* representativos de agrupamentos espaciais de inclusão social estão nela identificados na cor verde; em vermelho, estão indicados os *clusters* de exclusão social. Os *outliers*, quando identificados, ocorrem entre setores vizinhos, com uma dissimilaridade mais pronunciada do que a tendência global, sendo indicados: em amarelo, quando representativos de uma situação de inclusão; e, em laranja, quando o setor apresenta uma situação de exclusão.

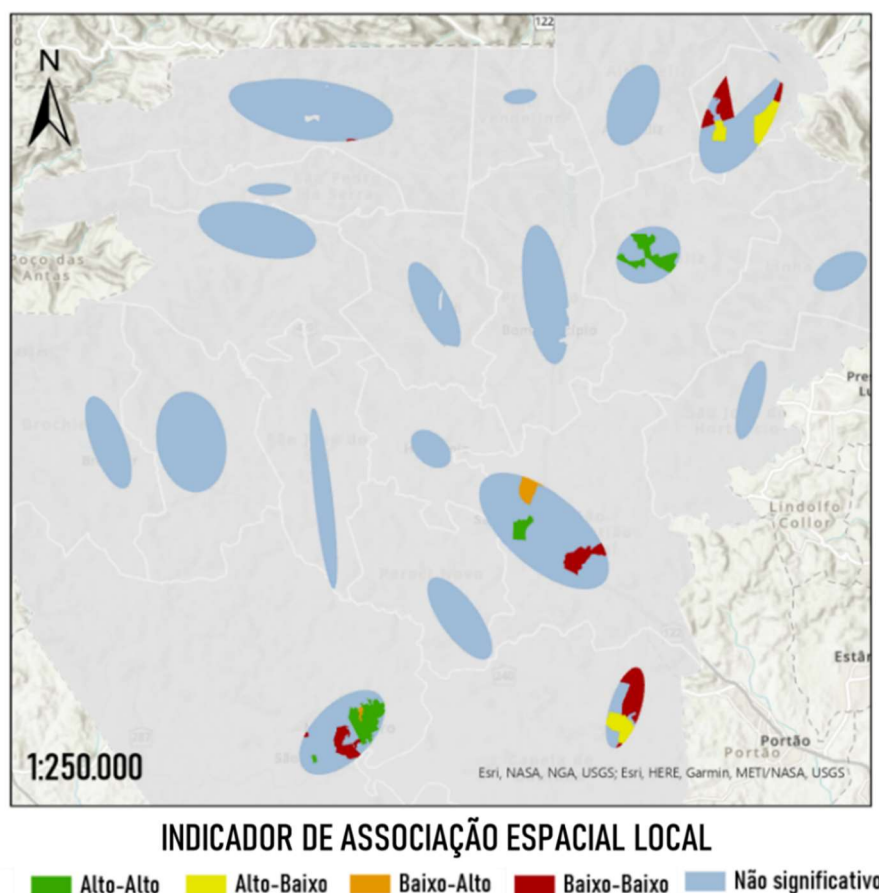


Figura 65: *Clusters* e *outliers* locais de Inclusão/Exclusão Social.
(Elaborada pela autora, 2022)

Tanto os *clusters* de exclusão (Baixo-Baixo), como os *outliers* de exclusão (Baixo-Alto) identificam áreas possíveis de segregação social. Tais áreas foram identificadas, mais acentuadamente, no município de Capela de Santana e, em menor extensão, em Montenegro, Vale Real e São Sebastião do Caí. *Outliers* de inclusão (Alto-Baixo) foram identificados nos municípios de Capela de Santana e de Vale Real, constituindo áreas de transição, que devem ser avaliados pontualmente, uma vez que podem, tanto indicar cenários de segregação social, quanto de movimentos positivos de mudança. Por outro lado, *clusters* de inclusão foram observados em Montenegro; em São Sebastião do Caí; e, notadamente, em Feliz, caracterizando agrupamentos espaciais de inclusão, com uma forte associação espacial. Na Figura 66, observa-se o detalhamento dos *clusters* e *outliers* locais de inclusão/exclusão social, identificados na área de estudo.

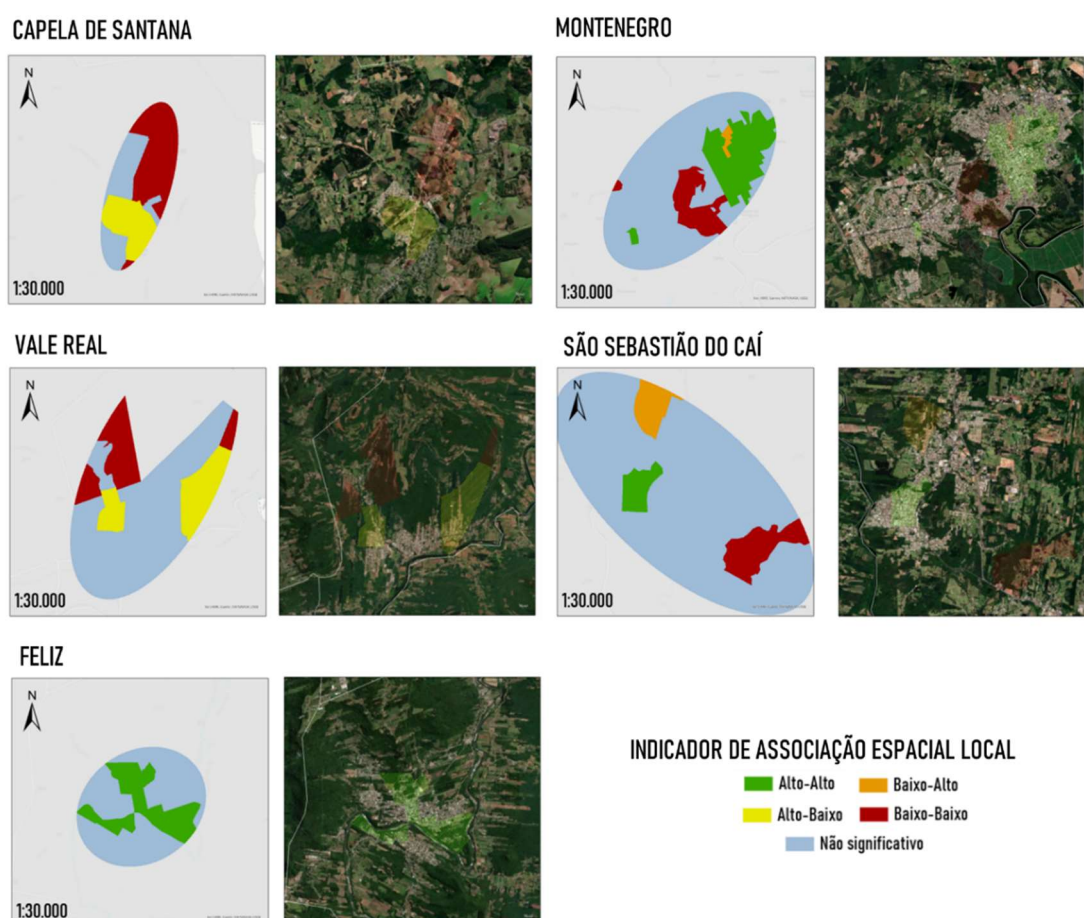


Figura 66. Detalhamento dos *clusters* e *outliers* locais de Inclusão/Exclusão Social.
(Elaborada pela autora, 2022)

5.2.3.3 Aplicabilidade da análise socioespacial

Metodologias de projeto que incluam a mensuração de desigualdades são fundamentais na busca por soluções para os problemas reais existentes nas cidades. Constata-se, pois, a importância do acesso e uso de ferramentas que possibilitem a realização de análises multiescalares, e que contemplem o caráter essencialmente espacial dos fenômenos urbanos.

Neste sentido, diante do importante componente territorial dos fenômenos relacionados à segregação urbana, a metodologia possibilita uma avaliação espacializada e objetiva da realidade local, considerando sua inserção no contexto regional. Mostrou-se como o uso de indicadores, associado a métodos de análise da estatística espacial, podem representar ferramenta importante, por exemplo, para a avaliação e para a proposição de políticas públicas de inclusão, baseadas em dados sobre a segregação urbana.

Destaca-se que a metodologia apresenta aplicação suficientemente flexível, podendo ser ampliada ou adaptada, em conformidade com os dados complementares disponíveis. A análise estatística exploratória, poderá ilustrar outras nuances da inclusão/exclusão territorial, aprofundando aspectos como: as condições individuais das famílias; as condições habitacionais; os dados do entorno e da infraestrutura; e a proximidade aos serviços sociais públicos básicos.

Adicionalmente, ressalta-se a possibilidade de utilização do método, não apenas pela esfera de gestão pública, mas também por cidadãos, ONGs, grupos de pressão e movimentos sociais. Com o acesso à informação sobre as condições de vida nas cidades ampliado, também se ampliam as possibilidades de cobranças por melhores condições de vida. O exercício da cidadania, desta forma, pode ser fortalecido, quando apoiado por dados da realidade local.

5.3 ANÁLISE DA PAISAGEM

Os padrões de distribuição espacial de ocupação urbana podem auxiliar no estabelecimento de planos estratégicos, podendo contribuir, tanto para a melhoria da qualidade de vida das comunidades (cf. seção 5.2), como para o planejamento territorial das cidades. Dessa forma, identificar e quantificar as propriedades estruturais das cidades pode servir de orientação para um planejamento mais sustentável de uso do solo para as mesmas.

No entanto, a elaboração de estudos, nas escalas interurbanas e intraurbanas, é, em parte, condicionada pelas informações disponíveis. Nesse sentido, o uso de imagens obtidas por sensoriamento remoto vem tornando possível uma melhor avaliação do território, em diferentes escalas, contribuindo para que, mesmo as pequenas e médias municipalidades, também possam ter acesso a informações relevantes sobre seu território e, assim, desenvolver tais estudos.

Ainda que esta tecnologia não permita identificar os propósitos que determinaram o uso que se faz do território, ela possibilita conhecer e quantificar as distintas formas de sua ocupação. Tal conhecimento pode ser facilitado por meio da interpretação das informações disponibilizadas por imagens, que permitem identificar os efeitos das ações antrópicas sobre o espaço, cabendo ao analista investigar suas causas e consequências. As técnicas de interpretação de imagens hoje disponíveis possibilitam, assim, incorporar à análise do território, em adição a informações sobre a composição espectral das emissões oriundas da superfície do solo, aspectos associados à sua ocupação, e que podem ser reveladas por variáveis como: formas, brilho, cor, textura, localização, bem como pela análise de contexto, em geral (SOUZA, 2012b). Ademais, informações registradas por diferentes satélites – com especificidades quanto à resolução espacial, temporal e espectral de imagens – podem contribuir para um conhecimento aprofundado de cidades, em diversas escalas de análise.

Considerando as informações disponíveis, que possibilitam aprofundar o conhecimento territorial do Vale da Felicidade, bem como a posterior replicação da metodologia em outras áreas de estudo brasileiras, a presente seção é dedicada à análise de sua paisagem nas escalas: regional, com base em informações de satélites da série Landsat; e intraurbana, com base em dados do satélite CBERS-4A.

5.3.1 Avaliação na Escala Regional

A análise da paisagem do Vale da Felicidade, na escala regional, buscou avaliar, ao longo de anos distintos, quatro aspectos: a cobertura vegetal; a evolução da área construída; a avaliação do potencial de sequestro de carbono; e a evolução do campo térmico, em cada cenário. Nesse contexto, entende-se que as imagens obtidas pelos satélites da série Landsat constituem uma fonte de dados adequada para a escala de avaliação proposta.

Primeiramente, é importante destacar que a resolução espacial e temporal dos sensores dos referidos satélites (30 metros e 16 dias, respectivamente) é compatível com a análise em escala regional. Outro ponto importante é a resolução espectral, a qual permite a identificação das diferentes respostas espectrais dos materiais que compõem a cobertura do solo. O acesso a tais variáveis possibilita, não apenas a elaboração de mapas temáticos, mas também a obtenção de índices baseados nos padrões contrastantes de refletância, em diferentes faixas do espectro, característicos dos diversos tipos de cobertura do solo, como ilustra a Figura 67.

À vista disso, por exemplo, nas áreas urbanas, a refletância na faixa do infravermelho médio apresenta, em geral, altos valores, enquanto a refletância na faixa do infravermelho próximo apresenta valores mais baixos; já, nas áreas de alto vigor vegetativo, observa-se que a refletância no infravermelho próximo irá apresentar altos valores, enquanto, na faixa do vermelho visível, esses valores costumam ser mais baixos.

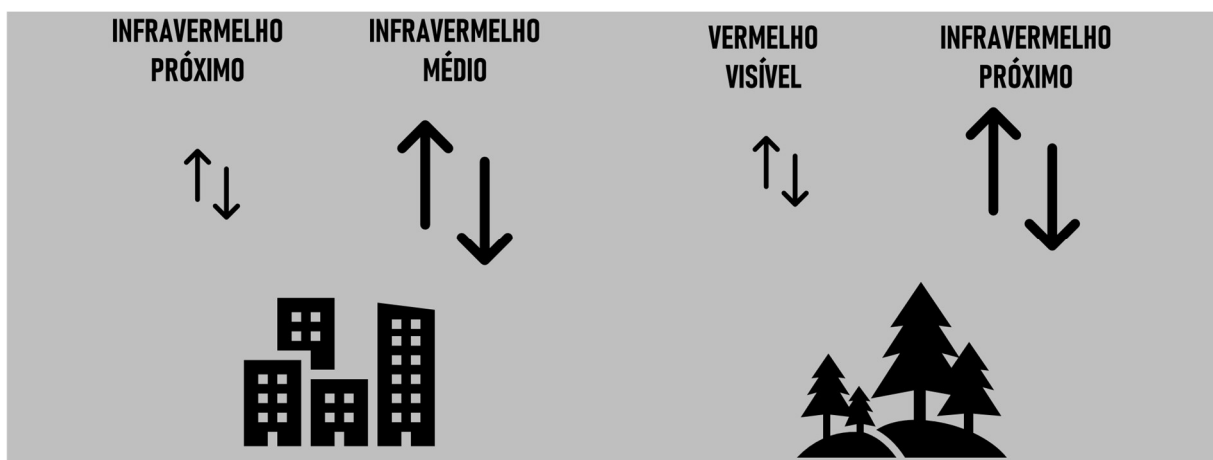


Figura 67: Padrões de refletância, em diferentes comprimentos de onda, característicos de diferentes materiais.
(Elaborada pela autora, 2022)

Com base nesse comportamento, são formulados alguns índices, tal qual o **índice de área construída por diferença normalizada** – ou *normalized difference built-up index* (NDBI) – proposto por Zha et al. (2003). Este índice permite obter informações relacionadas à expansão urbana, assim como a quantificação de áreas construídas e impermeáveis. Assim, verifica-se que quanto mais urbanizada a área alvo se apresenta, maior o valor do índice acima referido. Já, as áreas vegetadas ou corpos d'água, em geral, determinarão valores negativos. Em relação

ao mapeamento da vegetação, em termos de vigor vegetativo, o **índice de vegetação por diferença normalizada** – *normalized difference vegetation index* (NDVI) – também se baseia na diferenciação dos valores de refletância, em diferentes faixas do espectro. O índice, proposto por Rouse et al. (1973), e consagrado pela literatura, é calculado pela razão simples, entre as bandas do infravermelho próximo e do vermelho: quanto mais densa for a cobertura vegetal, menor será sua refletância na região do visível, dada a maior presença de pigmentos fotossintetizantes; já, a refletância no infravermelho próximo será maior, devido ao espalhamento da radiação eletromagnética nas camadas de folhas.

Adicionalmente, outro meio de avaliar a cobertura vegetal, com base nos contrastes espectrais da vegetação, em seus diferentes estágios, pode ser feito por meio do **índice de refletância fotoquímica** – *photochemical reflectance index* (PRI) – proposto por Gamon et al. (1992). Nessa perspectiva, observa-se que, quanto maior a atividade fotossintética, maior será a diferença entre as refletâncias nas faixas do azul e do verde. Por meio da integração entre o NDVI e o PRI, é possível a determinação de um indicador importante do fluxo de CO₂, associado à eficácia fotossintética da vegetação. No que tange a tal questão, diversos estudos evidenciam o desempenho das áreas verdes na prestação de serviços ecossistêmicos de suporte, sendo isso indicado pela forte relação entre a eficácia fotossintética da vegetação e o sequestro de dióxido de carbono da atmosfera (AMARAL et al., 2021; RAHMAN et al., 2000).

O processo de urbanização resulta em alterações na paisagem local, uma vez que são agregados à cobertura do solo, materiais com diferentes propriedades, não apenas em termos de resposta espectral, de permeabilidade e de possibilidades de uso, mas também em sua capacidade térmica. As relações entre a configuração urbana e o processo de formação de ilhas de calor urbanas têm sido frequentemente quantificadas, indicando como a configuração urbana se relaciona com o microclima e, conseqüentemente, influencia em questões como o conforto térmico e o consumo energético.

Conforme explica Amorim (2017), a perda de energia pelo solo coberto por vegetação ocorre por meio da evaporação e da evapotranspiração. Nesses processos, a transformação de calor sensível em calor latente e a transferência de energia para a atmosfera ocorrem sem aumento das temperaturas. Tal fato justifica a estabilidade térmica das áreas cobertas por vegetação. Essa dinâmica pode ser modificada, basicamente, devido a duas situações: alteração do vigor vegetativo e da umidade do solo, resultante de variações climáticas e sazonais; e supressão vegetal ou substituição da cobertura vegetada por estruturas urbanas.

Nesse cenário, o acompanhamento do microclima urbano é realizado, usualmente, com base em dados de estações meteorológicas, situadas em áreas urbanas e rurais. A aquisição e a manutenção de equipamentos de medições, assim como de equipes capacitadas para análise sistemática dos dados, requerem um investimento que, em geral, as pequenas e médias municipalidades não dispõem. Neste sentido, também o potencial pouco explorado da banda térmica do satélite Landsat pode trazer importantes contribuições.

Em síntese, nesta seção, o território abrangido pelo Vale da Felicidade será avaliado, em períodos distintos, em termos de: evolução das áreas construídas; vigor vegetativo e eficiência no uso da radiação pela vegetação; indicativos do sequestro de carbono pela vegetação; e temperaturas de superfície.

5.3.1.1 Detalhamento da metodologia

5.3.1.1.1 *Aquisição de imagens e pré-processamento*

Imagens da série histórica, foram adquiridas, de forma gratuita, no portal da USGS – *United States Geological Survey*¹⁷. Para tanto, a escolha das imagens seguiu os seguintes critérios: um baixo índice de cobertura de nuvens na área de estudo; a aquisição de imagens associadas ao período primavera-verão, de forma a reduzir as influências atmosféricas sazonais características de cada período. Assim, as imagens foram selecionadas a partir da Coleção 1, Nível 1, que apresentam correção geométrica adequada para análises temporais.

Foram selecionadas 48 cenas da órbita 221, sendo 24 delas referentes ao ponto 80; e as outras 24, ao ponto 81, para abranger toda a área do Vale da Felicidade, ao longo de 24 anos distintos. Na Tabela 1, são apresentadas as datas das imagens selecionadas e o satélite por meio do qual foram obtidas.

¹⁷ Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 20 de jun. de 2021.

Tabela 1 – Datas das imagens utilizadas

Landsat-5		Landsat-8
12/02/1987	19/12/2001	18/11/2013
29/11/1988	20/01/2002	21/01/2014
19/01/1990	11/02/2004	24/01/2015
06/01/1991	01/12/2006	15/03/2016
12/02/1993	03/02/2007	13/01/2017
30/01/1994	09/03/2008	17/02/2018
27/12/1998	07/01/2009	06/01/2020
17/03/1999	28/10/2011	08/01/2021

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Observa-se que, devido ao elevado índice de cobertura por nuvens na área de estudo, no período primavera-verão, não foi possível obter imagens adequadas à análise proposta, nos anos de 1989, 1992, 1995, 1996, 1997, 2000, 2003, 2005, 2010 e 2012. Dessa forma, com o intuito de uniformizar os períodos de análise, realizou-se uma média trianual, gerando-se 12 imagens de momentos distintos de uso e de cobertura do solo. A Figura 68, a seguir, identifica os anos das imagens utilizadas para o cálculo da média representativa, para cada um dos 12 períodos uniformizados considerados.

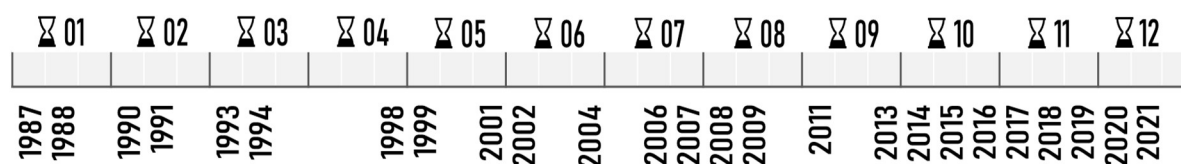


Figura 68: Composição dos 12 períodos uniformizados.
(Elaborada pela autora, 2022)

Inicialmente, os números digitais, que quantificam os píxeis das imagens, foram convertidos em uma grandeza física: a radiância espectral monocromática na abertura do sensor. Para a calibração radiométrica das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 – do satélite Landsat-5 – e das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 10 – do satélite Landsat-8 – aplicou-se a Equação 25 (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009):

$$L_{\lambda i} = M_L \times ND + A_L \quad \text{Equação 25}$$

em que L_{λ_i} é a radiância espectral na abertura do sensor em Watts/ ($m^2 sr \mu m$); ND é o número digital; M_L , é o fator multiplicativo; e A_L , o fator aditivo de redimensionamento da radiância, disponível no cabeçalho das imagens.

A refletância no topo da atmosfera, grandeza adimensional que expressa a relação entre o fluxo da radiação solar refletida e o fluxo de radiação incidente, é obtida pela Equação 26 (ALLEN *et al.*, 2002). Nesse viés, calculou-se a referida grandeza para as bandas multiespectrais utilizadas no presente trabalho, sendo essas: as bandas 1, 2, 3, 4 e 5, do satélite Landsat-5; e as bandas 2, 3, 4, 5 e 6, do satélite Landsat-8.

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \times L_{\lambda_i} \times dr^2}{K_{\lambda_i} \times \cos(ES)} \quad \text{Equação 26}$$

em que L_{λ_i} é a radiância espectral monocromática; K_{λ_i} é a irradiância espectral no topo da atmosfera; ES é o ângulo de elevação solar; dr é a distância relativa entre a Terra e o Sol, no dia da aquisição da imagem, em unidades astronômicas.

Para a correção dos efeitos da atmosfera, utilizou-se um modelo da família *Dark Object Subtraction* (DOS), de correções atmosféricas baseadas em imagens. A técnica empregada foi a DOS1, que parte das seguintes suposições: as transmitâncias atmosféricas nas direções da visualização e da iluminação são unitárias; e a irradiância difusa descendente é nula. Além disso, vale ressaltar que a precisão das técnicas baseadas na imagem é geralmente menor do que a das correções físicas; entretanto, tais técnicas podem melhorar a estimativa da reflexão da superfície terrestre, quando não há medidas atmosféricas disponíveis (CONGEDO, 2021).

Obteve-se a temperatura de brilho (T_b) no sensor, a partir das bandas termais (banda 6, do satélite Landsat-5; e banda 10, do satélite Landsat-8), por meio da Equação 27 (USGS, 2019).

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_i} + 1\right)} \quad \text{Equação 27}$$

em que K_1 e K_2 são as constantes de calibração, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Constantes de calibração da banda do termal dos satélites Landsat 5 e Landsat 8.

Satélite	K_1	K_2
	W/(m ² sr μm)	Kelvin
Landsat 5 – TM	607,76	1260,56
Landsat 8 – TIRS	774,89	1321,08

Fonte: Chander et al. (2009)

A etapa de pré-processamento das imagens foi automatizada com o uso do *plug-in Semi-Automatic Classification*, do software QGIS 3.18.3, desenvolvido por Congedo (2021).

5.3.1.1.2 Índice de Vegetação, de Sequestro de Carbono, de Área Construída e de Temperaturas Superficiais.

O Índice de Vegetação considerado na presente pesquisa, o NDVI, foi proposto por Rouse *et al.* (1973). Já consagrado pela literatura, foi aplicado, com o emprego da Equação 28:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{IV}_{\text{próximo}} - \text{Vermelho})}{(\text{IV}_{\text{próximo}} + \text{Vermelho})} \quad \text{Equação 28}$$

em que $\text{IV}_{\text{próximo}}$ é a refletância de superfície na faixa espectral do infravermelho próximo, representada pela banda 4 (Landsat-5) ou pela banda 5 (Landsat-8); e Vermelho é refletância de superfície na faixa espectral do vermelho, representada pela banda 3 (Landsat-5) ou pela banda 4 (Landsat-8).

Nessa perspectiva, o NDBI, que no presente trabalho representa o Índice de Área Construída, se baseia na característica da resposta espectral de áreas construídas, que apresentam maior refletância no infravermelho médio, do que no infravermelho próximo, e é expresso pela Equação 29 (ZHA; GAO; NI, 2003):

$$\text{NDBI} = \frac{(\text{IV}_{\text{médio}} - \text{IV}_{\text{próximo}})}{(\text{IV}_{\text{médio}} + \text{IV}_{\text{próximo}})} \quad \text{Equação 29}$$

em que $\text{IV}_{\text{médio}}$ é a refletância de superfície na faixa espectral do infravermelho médio, representada pelas bandas 5 (Landsat-5) ou 6 (Landsat-8).

Ademais, calculou-se o PRI, indicativo da refletância fotoquímica, conforme a Equação 30 (GAMON; PENUELAS; FIELD, 1992):

$$PRI = \frac{(Azul-Verde)}{(Azul+Verde)} \quad \text{Equação 30}$$

em que Azul é a refletância de superfície na faixa espectral do azul, representada pelas bandas 1 (Landsat-5) ou 2 (Landsat-8); e Verde é a refletância de superfície na faixa espectral do verde, representada pelas bandas 2 (Landsat-5) ou 3 (Landsat-8).

O valor escalonado de PRI (ou sPRI), a fim de representá-lo como uma medida de eficiência, foi calculado de acordo com a Equação 31, a seguir (AMARAL et al., 2021; RAHMAN et al., 2000):

$$sPRI = \frac{PRI+1}{2} \quad \text{Equação 31}$$

As variações do desempenho da vegetação, no sequestro de carbono e de sua consequente eficácia fotossintética, foram estimadas por meio do índice CO₂flux, expresso pela Equação 32, abaixo (AMARAL et al., 2021; RAHMAN et al., 2000):

$$CO_{2flux} = NDVI \times sPRI \quad \text{Equação 32}$$

Para estimar a temperatura da superfície, utilizou-se a Equação 33 (WENG et al., 2004).

$$T_S = \frac{T_b}{[1 + (\lambda \times \frac{T_b}{h \times c / s}) \times \ln(\epsilon_i)]} - 273,15 \quad \text{Equação 33}$$

em que T_S é a temperatura da superfície, em °C; T_b é a temperatura de brilho, em K; λ é o comprimento de onda da radiação emitida; c é constante de Planck, equivalente a $6.626 \times 10^{-34} J s$; s é a constante de Boltzmann, equivalente a $1,38 \times 10^{-23} J/K$; c é a velocidade da luz, equivalente a $2,998 \times 10^8 m/s$; e ϵ_i , é a emissividade, estimada pela expressão:

$$\epsilon_i = 1,0094 + 0,047 \times \ln(NDVI) \quad \text{Equação 34}$$

Os cálculos e a espacialização dos resultados foram realizados no software ArcGIS 10.5.1. As operações foram automatizadas, por meio de duas ferramentas desenvolvidas pela autora¹⁸, destinadas à execução de todas as operações apresentadas, em ambiente ArcGIS, para imagens dos satélites Landsat-5 e Landsat-8. Adicionalmente, as ferramentas realizam as operações de: projeção para o sistema SIRGAS 2000; o mosaico das cenas, nos pontos 80 e 81; e o recorte da área de estudo. Não obstante, é importante ressaltar que, embora o uso das ferramentas

¹⁸ As ferramentas podem ser adaptadas para outras áreas de estudo e estão disponíveis para download em: https://drive.google.com/drive/folders/1N96AuijS_kVF09y_4c6WejleJHWPRhza?usp=sharing.

disponibilizadas possa facilitar a execução dos processos acima descritos, é possível também sua reprodução em outros softwares livres, de geoprocessamento.

5.3.1.1.3 Detecção de Mudanças

Para quantificar as mudanças no ambiente construído e a resposta térmica associada, foi proposto um índice de detecção de mudança (*Change Detection Index – CDI*)¹⁹. Nesse sentido, o seu cálculo é realizado com o emprego da Equação 35, e esquematizado na Figura 69.

$$CDI = (TS_f - TS_0) \times (NDBI_f - NDBI_0) \quad \text{Equação 35}$$

em que: TS_f e TS_0 são as temperaturas superficiais, respectivamente, no momento final (2020-21), e no momento inicial (1987-88); e $NDBI_f$ e $NDBI_0$ são o NDBI, no momento final (2020-21) e no momento inicial (1987-88), respectivamente.

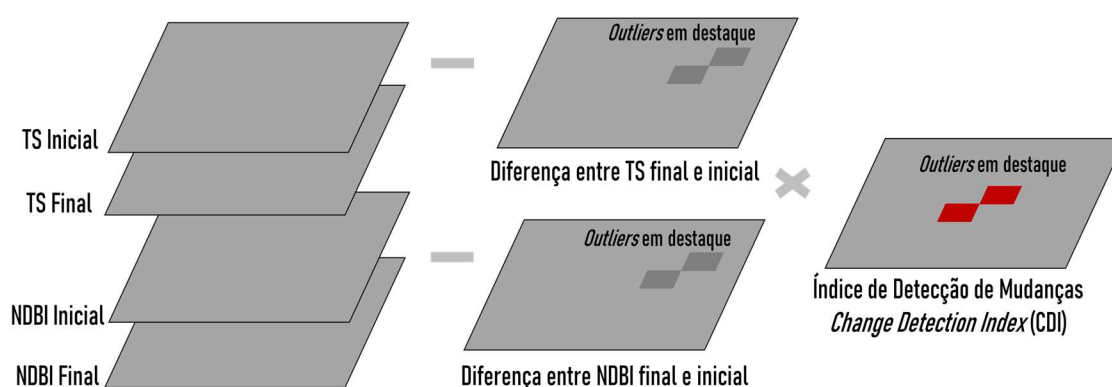


Figura 69: Diagrama esquemático da obtenção do CDI
(Elaborada pela autora, 2022, adaptado de Silva e Torres (2021))

O mapeamento das principais diferenças de NDBI e de TS foi realizado no software ArcGIS 10.5.1, destacando-se os pixels cujos valores de CDI são *outliers* superiores, ou seja, são superiores ao terceiro quartil, acrescido de 1,5 da distância interquartil, para que seja possível identificar as regiões com as mudanças mais significativas. Como resultado, o mapeamento do índice de detecção de mudança permite integrar essas informações em um único índice, de forma simples, reduzindo o tempo de análise e melhorando sua precisão. Além disso, o

¹⁹ O método foi proposto pela autora e publicado em Silva e Torres (2021).

mapeamento permite identificar, objetivamente, as regiões com mudanças na temperatura superficial, associadas especificamente à substituição de áreas verdes por áreas urbanizadas.

5.3.1.1.4 Identificação de Padrões Emergentes


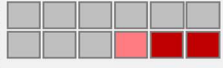
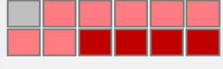
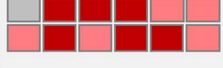

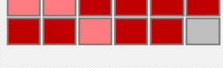
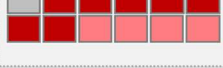
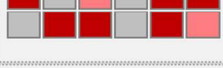

No intuito de avaliar as diversas dinâmicas de mudança decorrentes da alteração na cobertura da terra, considerando cada um dos 12 períodos de informações disponíveis (cf. Figura 68), buscou-se a identificação de padrões emergentes relativos à temperatura superficial e ao NDBI na área do Vale da Felicidade. Para tal, uma análise de *hot spots* emergentes foi realizada, a partir da identificação das tendências reveladas pelos dados, ao longo do tempo, e das variáveis de temperatura superficial e de NDBI.

De início, é importante contextualizar o uso do termo *hot spot*: genericamente, o termo tem sido usado em diversas disciplinas para descrever uma região caracterizada por valores superiores da variável analisada, quando comparada ao entorno, conforme Harris et al. (2017). No presente trabalho, avaliaram-se os *hot spots*, em termos da temperatura superficial e do NDBI. Nesse sentido, a ocorrência *clusters* espaciais de *hot spots* foi realizada com base na estatística Getis-Ord G_i^* , que mede a intensidade de agrupamento de valores altos ou baixos na área de estudo. Assim, dois valores baseiam a identificação dessas áreas: os desvios padrões (escore z ou z -score) e as probabilidades estatísticas (valor p ou p -value) (GETIS; ORD, 1992). Por esse ângulo, uma pontuação do escore z , acima de 1,65, indica que existe um *hot spot* estatisticamente significativo em um nível de significância de $p < 0,10$. Tal resultado indica que as chances de o padrão espacial observado ser resultado de um processo aleatório são de apenas 10%. Ademais, para a consideração da vizinhança de cada pixel, utilizou-se a técnica *k-nearest neighbors*, com $k = 8$. Desta forma, foram assumidos, como vizinhos de cada pixel, os 8 pixels mais próximos a ele.


Em seguida, a análise das tendências ao longo da série cronológica baseou-se no teste estatístico de Mann-Kendall (KENDALL, 1951; MANN, 1945), o qual consiste na aplicação do teste de correlação de ordem de classificação de Kendall, para dados de séries cronológicas (HARRIS et al., 2017). Desse modo, a referida análise permite que sejam identificadas, tanto as tendências de redução e de intensificação, como também a existência de *hot spots* novos ou esporádicos.

Posteriormente, a análise de *hot spots* emergentes foi realizada, por meio do software ArcGIS Pro, fazendo uso de uma ferramenta que, com base nos resultados estatísticos acima descritos,

categoriza cada local da área de estudo conforme os padrões observados, e apresentados na Figura 70.

Padrão Emergente de <i>hotspot</i>	Descrição
	Sem Padrão Detectado Não é descrito por nenhum dos padrões definidos.
	Consecutivo É identificada uma única sequência ininterrupta de <i>hot spots</i> estatisticamente significativos, que ocorrem somente nos intervalos finais. Os <i>hot spots</i> são identificados em menos de 90% do tempo.
	Em Intensificação São identificados <i>hot spots</i> estatisticamente significativos em 90% do tempo, incluindo os períodos mais recentes. Além disso, a intensidade do <i>cluster</i> teve um aumento estatisticamente significativo.
	Persistente São identificados <i>hot spots</i> estatisticamente significativos em 90% do tempo, porém sem nenhuma tendência de aumento ou redução na intensidade do <i>cluster</i> ao longo do tempo.
	Oscilante <i>Hot spots</i> estatisticamente significativo são identificados no intervalo final e, em algum intervalo anterior, foi também identificado um <i>cold spot</i> . Em menos de 90% do tempo, são identificados <i>hot spots</i> significativos.
	Histórico Em pelo menos 90% do tempo, são identificados <i>hot spots</i> estatisticamente significativos, exceto no intervalo mais recente.
	Em redução São identificados <i>hot spots</i> estatisticamente significativos em 90% do tempo, incluindo o período mais recente. Além disso, a intensidade do <i>cluster</i> teve uma redução estatisticamente significativa.
	Esporádico Os <i>hot spots</i> são identificados esporadicamente, em menos de 90% do tempo, e não são identificados <i>cold spots</i> estatisticamente significativos.
	Novo É identificado um <i>hot spot</i> estatisticamente significativo apenas no intervalo final.

Legenda: Variação do padrão identificado para um mesmo ponto no espaço, ao longo do tempo.

 01 02 03 04 05 06
07 08 09 10 11 12





 Sem padrão observado  *Hot spot* de maior intensidade
 *Cold spot*  *Hot spot* de menor intensidade

Figura 70: Padrões de *hot spots* emergentes.
(Elaborada pela autora, 2022)

5.3.1.2 Mapeamento do Índice de Vegetação, de Sequestro de Carbono, de Área Construída e de Temperaturas Superficiais

As variações do vigor vegetativo, na área de estudo, no período entre 1987-88 e 2020-21, estão visíveis na Figura 71. Observa-se que, devido à alta cobertura vegetal na área estudada, os índices de vegetação apresentam maiores valores médios no período final. Primeiramente, tal

fato é ilustrado no mapeamento apresentado na Figura 71 (a), em que se pode observar a intensificação do vigor vegetativo nas áreas vegetadas, destacadamente na porção norte da área de estudo. Na sequência, no histograma apresentado Figura 71 (b), é possível observar que, enquanto no período inicial os valores de NDVI mais frequentes estavam entre 0,74 e 0,81, no período final eram mais frequentes os valores entre 0,81 e 0,89. Finalmente, no resumo estatístico apresentado na Figura 71 (c), observa-se o aumento no valor médio do NDVI.

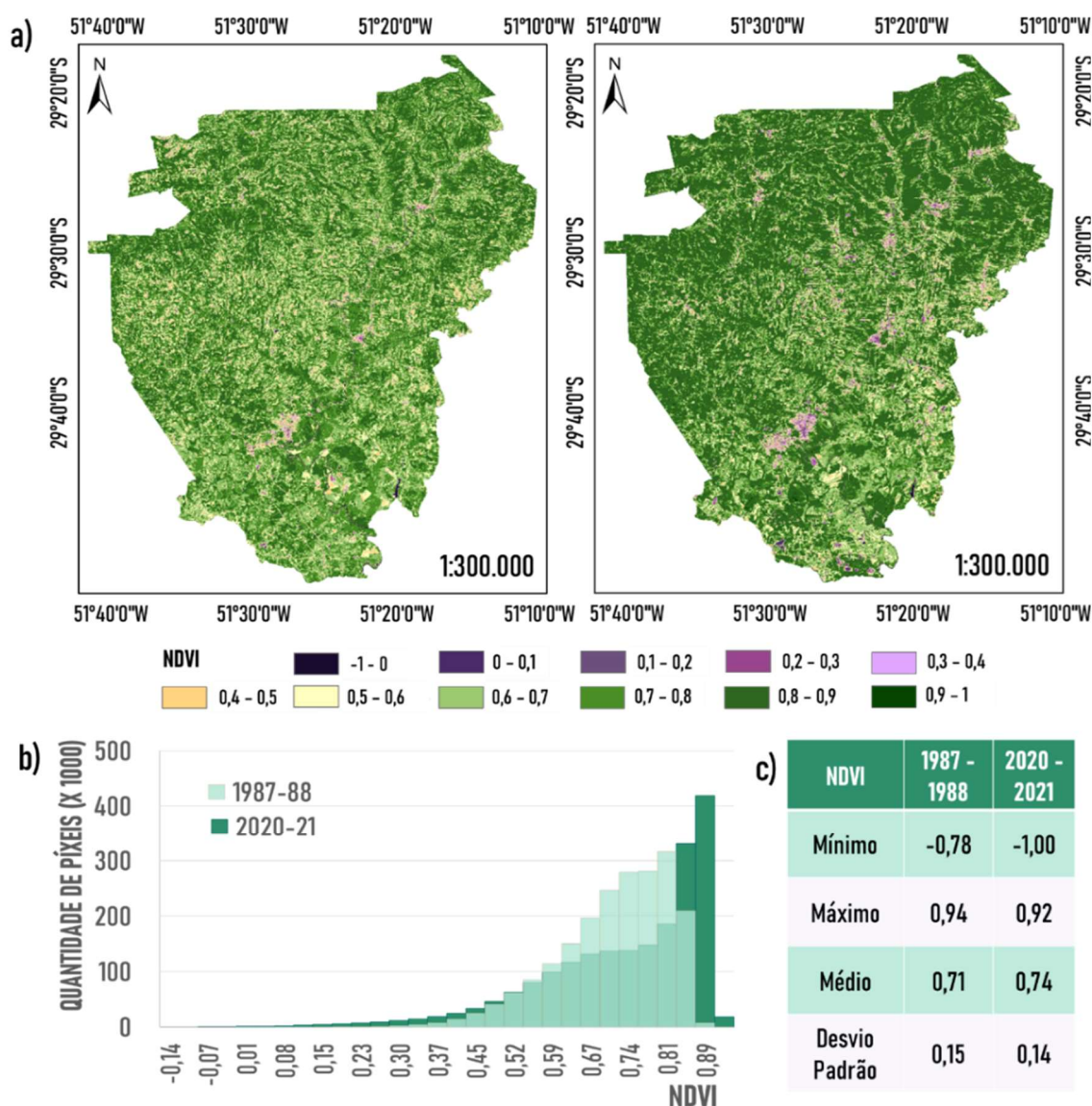


Figura 71: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI, no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21): a) mapeamento; b) distribuição dos valores do NDVI; e c) resumo estatístico. (Elaborada pela autora, 2022)

À vista disso, ressalta-se que, apesar de o histograma de distribuição do NDVI, no período final, estar deslocado para a direita – indicando um aumento do vigor vegetativo nas áreas verdes da região, os valores mais baixos do índice são os que se apresentam em maior frequência, se comparados com aqueles do período inicial. Esses valores reduzidos do NDVI podem estar associados a áreas de vegetação rasteira, de solo exposto ou de urbanização. Em adição, é importante ressaltar um aspecto na variação do NDVI, na área estudada: ainda que as áreas nas quais decorreu a redução do NDVI não sejam predominantes, sua ocorrência pode estar associada à supressão vegetal em áreas de urbanização incipiente.

Na Figura 72, observa-se que o sequestro de dióxido de carbono pela vegetação, conforme estimado pelo indicador CO_{2flux} , foi intensificado no período final, se comparado ao período inicial. Tal fato está associado ao alto índice da cobertura vegetal presente na área de estudo, cuja eficácia fotossintética está fortemente relacionada ao elevado índice de vigor vegetativo, nas áreas de vegetação florestal, e ao estágio de crescimento da produção, nas áreas agrícolas.

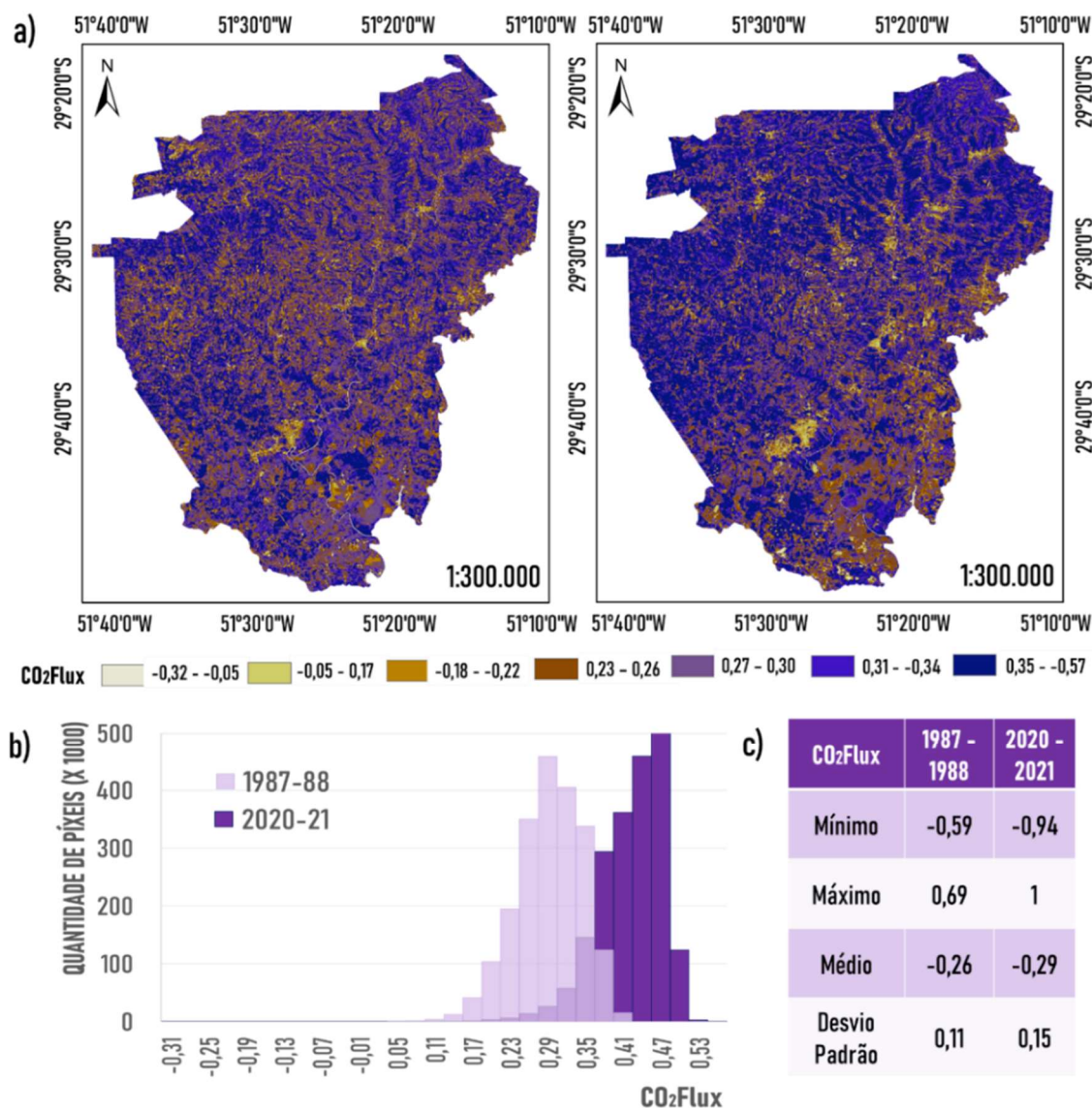


Figura 72: Indicador de Sequestro de Carbono pela Vegetação: a) mapeamento; b) distribuição do índice no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21); e c) resumo estatístico. (Elaborada pela autora, 2022)

Embora seja possível identificar um aumento médio do fluxo de CO₂, algumas áreas com reduções significativas podem ser observadas no mapa (nas tonalidades de amarelo), as quais foram intensificadas no período final. Essas áreas estão localizadas, principalmente, junto aos centros de densidade populacional, onde parte da vegetação foi substituída por área construída. Além disso, vale destacar que nessas áreas, a manutenção de áreas verdes tem papel fundamental na prestação de serviços ecossistêmicos de suporte, já que possibilitam o sequestro de carbono da atmosfera, nas proximidades dos locais em que o uso do solo é tal que leva à emissão do poluente.

Apresenta-se, na Figura 73, o índice de área construída nos períodos inicial e final.

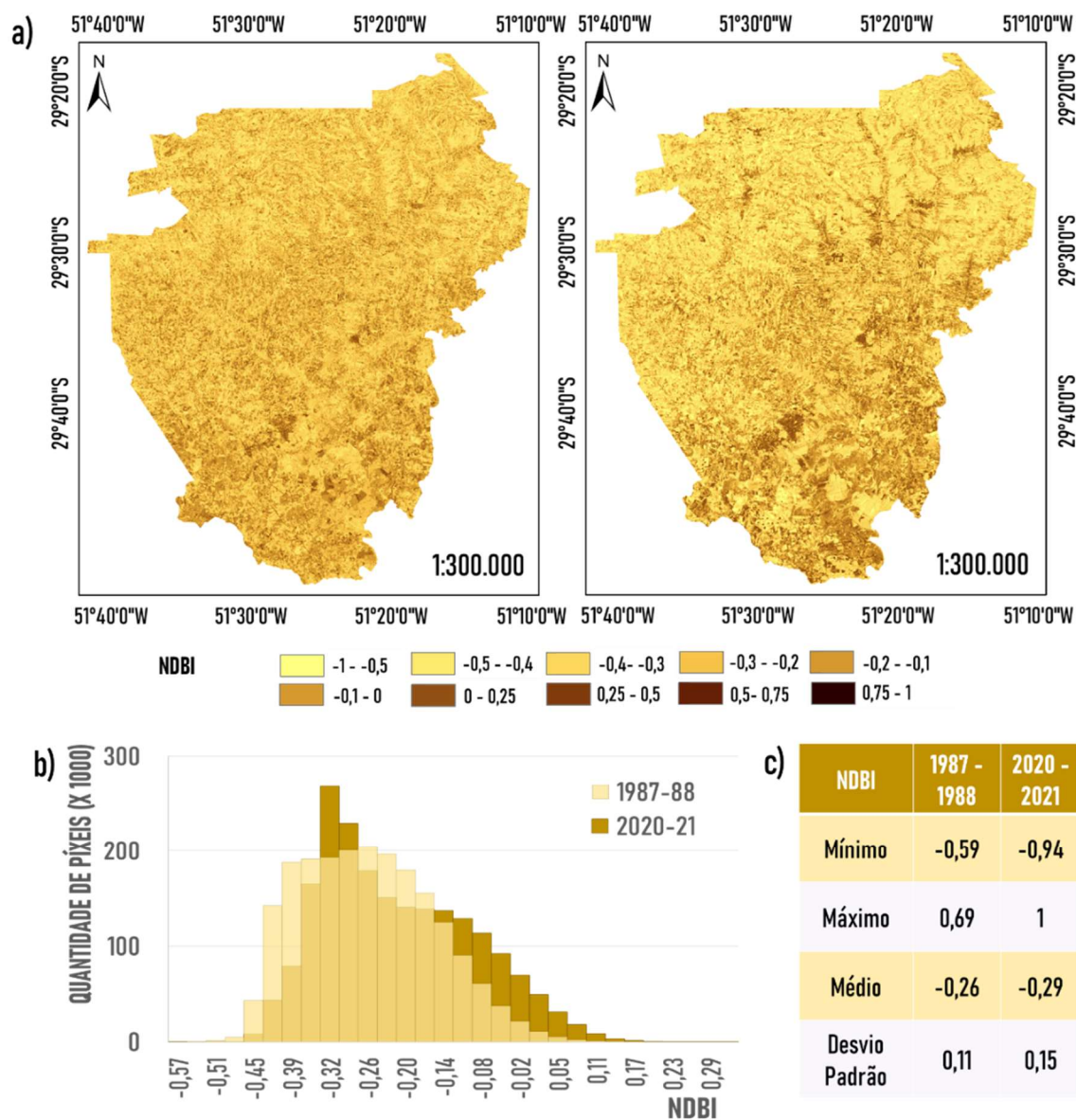


Figura 73: Índice de Área Construída por Diferença Normalizada: a) mapeamento; b) distribuição do índice no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21); e c) resumo estatístico.
(Elaborada pela autora, 2022)

Observa-se um aumento geral do índice, indicado pelo deslocamento histograma para a direita, bem como uma maior frequência de valores de NDBI mais altos, no período final de análise, conforme ilustrado na Figura 73 (b). No mapeamento, observa-se que os aumentos mais significativos no índice de área construída ocorrem mais intensamente nas áreas onde estão

situados os núcleos de densidade populacional, indicando que a supressão vegetal, identificada pela redução do NDVI e do CO_{2flux} nessas áreas, está relacionado ao aumento da área construída.

Apresenta-se a distribuição espacial das temperaturas superficiais na área de estudo (Figura 74), correspondente aos períodos inicial e final analisados.

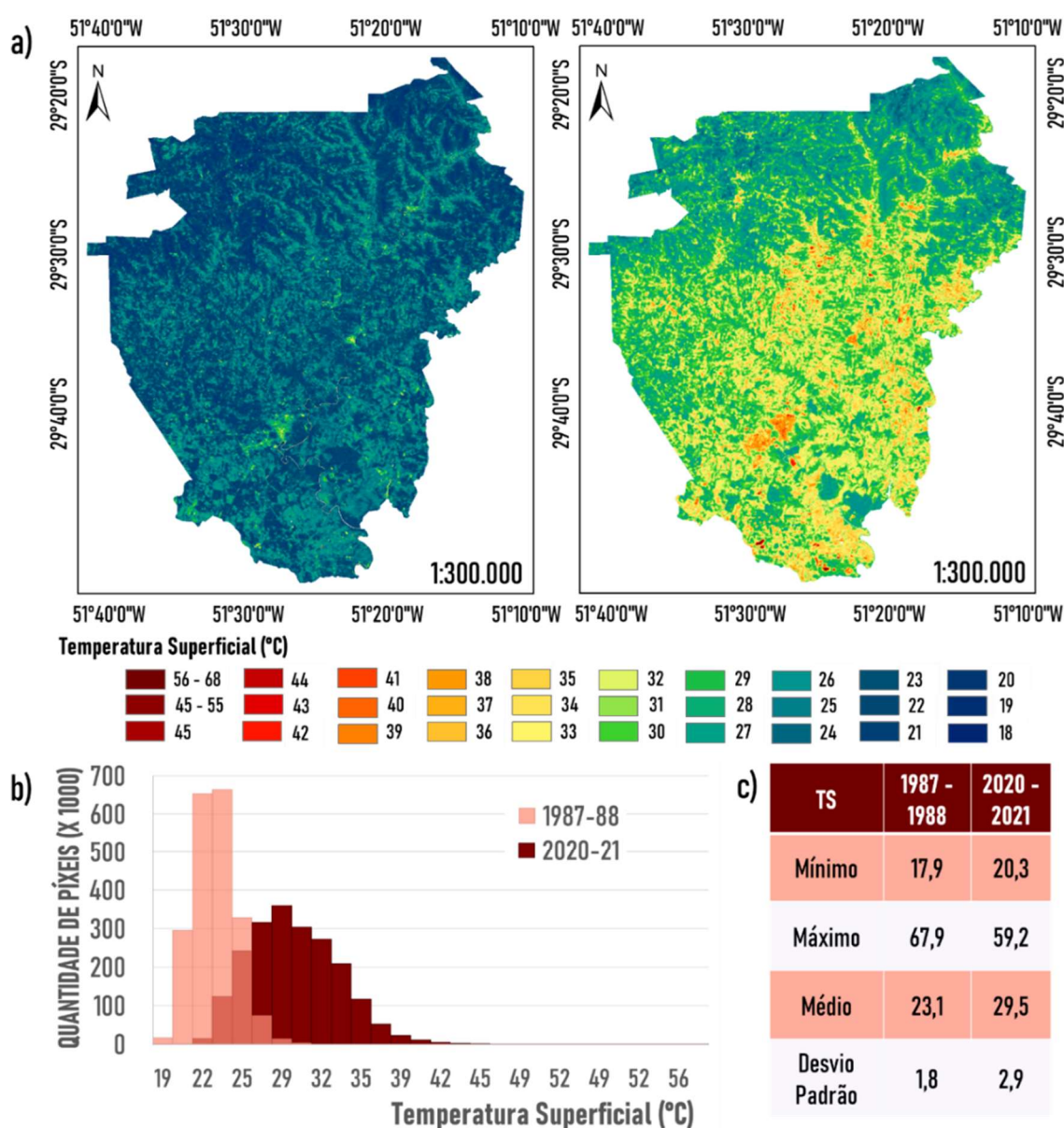


Figura 74: Temperatura de Superfície: a) mapeamento; b) distribuição do índice no tempo inicial (1987-88) e final (2020-21); e c) resumo estatístico.

(Elaborada pela autora, 2022)

Percebe-se que houve um aumento de 6,4 °C nas temperaturas médias locais, conforme evidenciado pelo deslocamento do histograma de distribuição das temperaturas superficiais para a direita. Apesar de o referido aumento das temperaturas superficiais poder estar associado a diversos fatores climáticos, é importante destacar, com base na análise dos resultados, que o crescimento da temperatura da superfície não ocorreu de modo uniforme em todo o território.

Ademais, observa-se que, no período inicial, as temperaturas de superfície estão distribuídas de forma mais uniforme; enquanto, no período final, as temperaturas na parcela norte da área de estudo são destacadamente menores do que as das áreas central e sul. Esse padrão também é observado, ainda que com menor intensidade, quando se analisa o vigor vegetativo (cf. Figura 71). Ressalta-se, igualmente, a ocorrência de um aquecimento mais expressivo em algumas áreas, coincidentes com aquelas onde o aumento do índice de área construída também apresenta destaque (cf. Figura 73).

Nos histogramas apresentados na Figura 75, é possível observar as distribuições das mudanças: no vigor vegetativo; no indicador de sequestro de CO₂ da atmosfera; no índice de área construída; e nas temperaturas superficiais nos CDPs, entre os períodos inicial e final. Desse modo, identifica-se que as mudanças nesse recorte da área estudada são ligeiramente superiores às alterações médias de toda a região. O percentil de 90% é identificado pela linha tracejada em vermelho, na figura. Ademais, ainda que se identifiquem aumentos quantificáveis no índice de vegetação e, conseqüentemente, no sequestro de carbono da atmosfera, os aumentos mais expressivos estão associados ao índice de área construída.

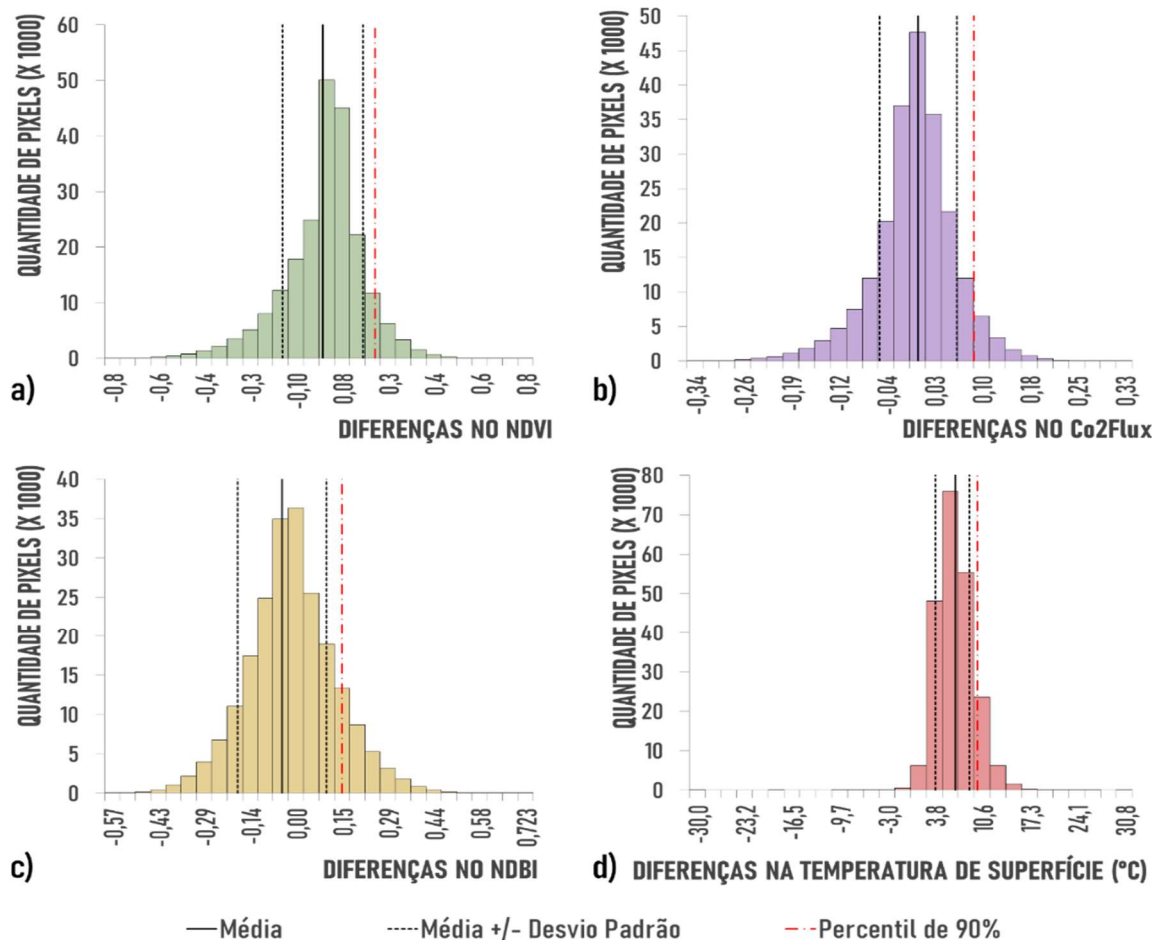


Figura 75: Histograma das mudanças entre os períodos inicial e final: a) no vigor vegetativo; b) no fluxo de CO₂; c) na área construída; e d) nas temperaturas de superfície. (Elaborada pela autora, 2022)

A análise das alterações ocorridas no NDVI, no CO₂flux, no NDBI e na temperatura superficial, nos CDPs de cada município, possibilitou a identificação de diversos padrões de mudanças. Entre as variáveis avaliadas, a temperatura de superfície foi a que apresentou mudanças mais significativas. No CDP do município de Alto Feliz, o aumento da temperatura média foi de 4,2 °C, sendo 2,2 °C inferior ao aumento médio da região. Já, no município de Montenegro, o aumento médio das temperaturas superficiais foi de 9,4 °C, o mais expressivo entre os centros de densidade, sendo 3,0 °C superior ao aumento médio das temperaturas da região.

Quando avaliadas as mudanças nas temperaturas, em conjunto com as alterações no NDVI, no NDBI e no CO₂flux, destacam-se dois padrões. O primeiro deles é identificado nos municípios de São José do Hortêncio, de Montenegro e de Capela de Santana, onde se observa que os aumentos mais expressivos na temperatura superficial e na área construída são acompanhados,

também, pelas reduções mais significativas no índice de vegetação e na capacidade de sequestro de carbono. Já, no município de Feliz, um padrão singular foi identificado: o aumento da área construída, que foi, contudo, acompanhado pelo vigor vegetativo e pelo indicador de sequestro de carbono. Merece ser destacado o fato de que o aumento na temperatura superficial local, de 6,6 °C, não figura entre os maiores na região, estando bem próximo ao aumento médio ocorrente na área de estudo, em sua totalidade. Nesse contexto, tal resultado pode estar associado aos índices adequados de vegetação urbana no município, pois, ainda que a área construída tenha aumentado, o índice de vegetação também aumentou.

Destaca-se, também, que os padrões acima referidos apresentam uma forte associação espacial, como apresentado na Figura 76. Identifica-se que as áreas municipais nas quais ocorreram os aumentos mais expressivos de NDBI coincidem, em muitos pontos, com aquelas nas quais os aumentos mais relevantes na temperatura superficial foram também identificados.

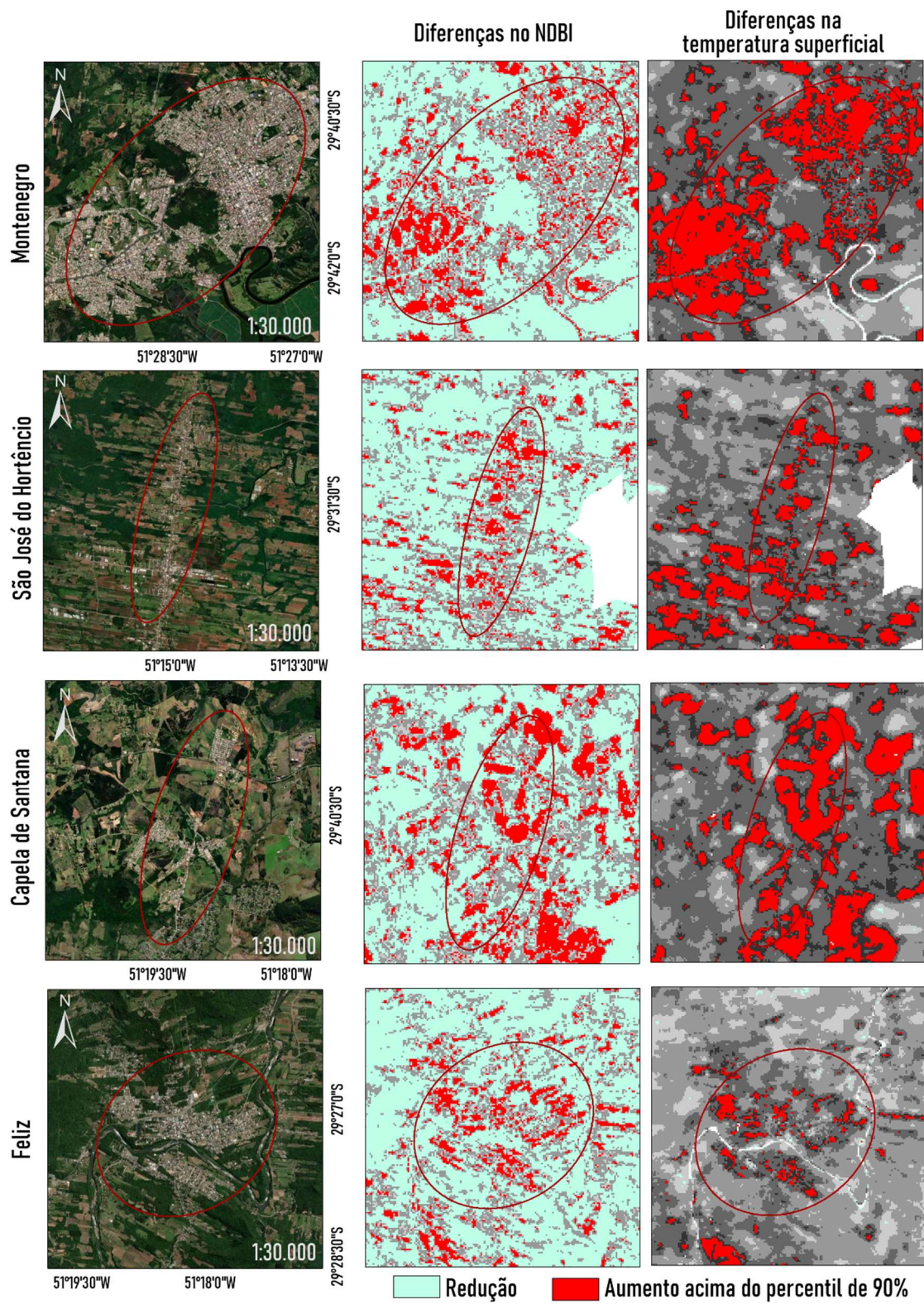


Figura 76: Diferenças no NDBI e na temperatura superficial.
(Elaborada pela autora, 2022)

Nesta etapa, a avaliação de cada imagem permite identificar a relação entre as mudanças mais significativas em termos de área construída e aquela ocorrida na temperatura da superfície correspondente. Embora essa avaliação contribua para uma visão geral da dinâmica das mudanças no território, ela não possibilita uma integração efetiva das informações. Diante disso, na próxima seção, será avaliada a aplicação de um índice de detecção de mudanças (CDI), que propõe a associação das informações, evidenciando as relações entre as mudanças ocorridas no ambiente construído e o campo térmico das municipalidades.

5.3.1.3 Índice de Detecção de Mudanças

A Figura 77 (a) exibe a distribuição espacial do CDI, o índice de detecção de mudanças, por meio do qual podem ser identificados os locais onde as maiores variações de NDBI são acompanhadas por um aumento significativo da temperatura superficial. Na cor vermelha, identificam-se os *outliers* superiores: em tais áreas, foram registrados valores atípicos, distintos daqueles observados em todo o território do Vale da Felicidade.

Os municípios de Montenegro e de Capela de Santana figuram entre aqueles que apresentaram valores médios do CDI mais elevados, cujos locais de ocorrência podem ser observados na Figura 77 (b). A avaliação do NDBI e da temperatura de superfície, individualmente (cf. seção 5.3.1.2), já fornecia indícios da ocorrência de tal padrão espacial, confirmado e detalhado com a análise do CDI. Assim, o índice proposto é considerado adequado, como um sintetizador das variações de temperatura e de área construída.

Além disso, os mesmos municípios ostentam as maiores áreas nas quais se identificam valores atípicos do CDI, nos centros de densidade populacional: enquanto a elipse de distribuição direcional das densidades populacionais, em Capela de Santana, é constituída por *outliers*, em 13,5% de toda sua área, no município de Montenegro tal situação é observada em 12,3% do território abrangido pelo CDP. Ilustrando tais associações, a Figura 77 (c) apresenta a distribuição das faixas de CDI, por área do CDP de cada município.

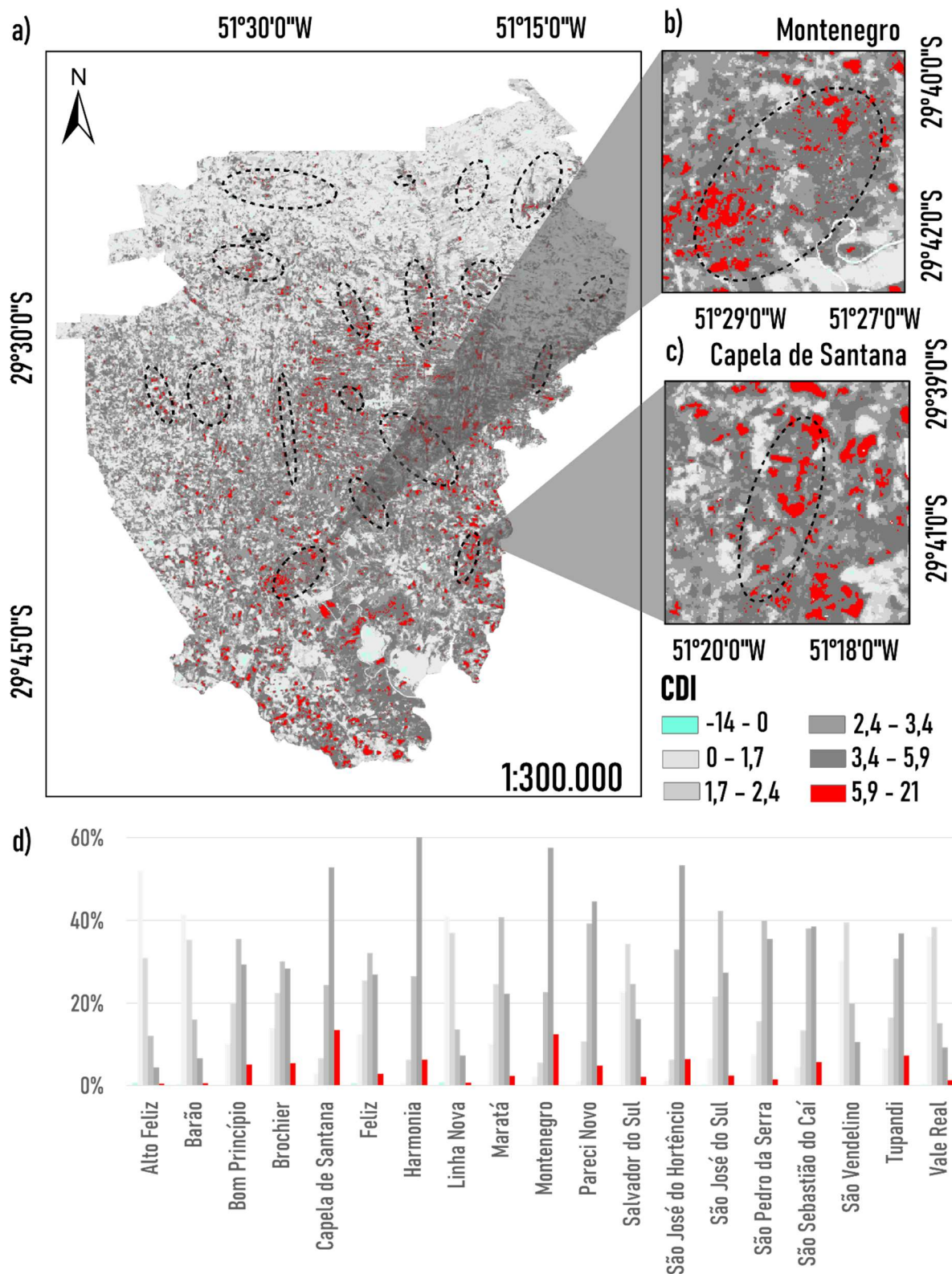


Figura 77: a) Índice de Detecção de Mudanças, entre as imagens representativas de 1987-88 e 2020-21; b) destaque para o município de Montenegro; c) destaque para o município de Capela de Santana; e d) percentual de área das diferentes classes de CDI, identificado por CDP de cada município. (Elaborada pela autora, 2022)

Os valores elevados do índice indicam que as mudanças urbanas resultaram em aumentos térmicos significativos. Os valores negativos, por sua vez, identificam áreas vegetadas, podendo estar associadas a uma redução do vigor vegetativo, não resultante de uma intensificação da área construída. Em áreas cobertas por vegetação, a umidade também tem uma influência considerável nas variações de temperatura, motivo pelo qual a interpretação do CDI, no presente contexto, foca-se nos valores positivos mais altos do índice. A interpretação geral do CDI é exposta na Figura 78.



Figura 78: Interpretação geral do CDI.
(Elaborada pela autora, 2022, traduzido de Silva e Torres, 2021)

A análise do CDI pode ser considerada como de grande valia para um diagnóstico integrado das mudanças na temperatura da superfície e da cobertura do solo, em áreas construídas. Ademais, resulta de uma análise simplificada e orientada por dados, possibilitando sua inclusão na rotina dos estudos urbanos e podendo ser desenvolvida, mesmo em situações técnicas adversas, pelo fato de reduzir o tempo e a complexidade da análise.

Em consonância ao apresentado pela autora, em Silva e Torres (2021), os resultados obtidos pela análise do índice podem orientar o atendimento à demanda por estudos mais precisos e específicos, não requerendo os investimentos significativos de pesquisas de campo, facilitando o acesso a dados de importância para um melhor planejamento urbano, em um contexto orçamentário limitado, no qual, em geral, estão inseridas as pequenas municipalidades. Além disso, com a análise do CDI, identificam-se as práticas positivas de ocupação do território na realidade local, bem como aquelas onde foram agravados os problemas determinantes da elevação da temperatura superficial. Deste modo, podem ser obtidos indicativos de como novos empreendimentos poderão ser melhor conduzidos, com base em soluções possíveis e já adotadas no município.

É importante destacar, entretanto, que o método tem a limitação de ser uma análise indicativa, baseada em mudanças na cobertura do solo, em dois momentos determinados. O método não permite um estudo temporalmente detalhado das mudanças na cobertura do solo e do campo térmico. Nesse sentido, na seção seguinte, serão apresentados os resultados da identificação de padrões locais emergentes, os quais possibilitam, efetivamente, a inclusão da variável tempo, na análise das mudanças ocorridas na área de estudo.

5.3.1.4 Identificação de Padrões Locais Emergentes

A identificação de ilhas de calor nas cidades parte da hipótese de que a distribuição espacial de temperaturas não é resultado de um processo aleatório; ou seja, há uma correlação espacial entre os dados de temperatura que formam *clusters*, regiões onde a temperatura é superior às temperaturas observadas nas vizinhanças e onde esse fenômeno está fortemente associado à cobertura do solo. Em vista disso, além da variabilidade espacial de padrões de cobertura do solo e de temperaturas superficiais, avaliou-se, também, no território do Vale da Felicidade, a manifestação de padrões espaço-temporais relacionados ao campo térmico e à cobertura do solo.

Durante os 12 períodos de análise (cf. Figura 68), não foram identificados indicativos significativos de mudanças nas temperaturas superficiais, em 54% da área de estudo. Mas, em 17% da área total, as manifestações da temperatura superficial, ao longo do tempo, estiveram associadas aos padrões de *cold spot*. Em contraposição, os padrões emergentes relacionados aos *hot spots* da temperatura superficial, foram evidenciados em 29% de todo o território.

Na Figura 79, é identificado o percentual da área caracterizada pelos padrões emergentes de *hot spots*, relacionados à temperatura superficial, tanto em todo o território do Vale da Felicidade, como também nos recortes dos CDPs dos municípios. Na escala da região, predominam os padrões de mudanças associados a *hot spots* esporádicos (14% da área total) e oscilantes (10% da área total). Por outro lado, quando observados apenas os recortes das elipses de distribuição direcional das densidades populacionais, as áreas sem padrões de mudanças detectados caracterizam 43% da área, e a incidência de *hot spots* esporádicos aumenta para 18%. O segundo padrão predominante nessas áreas é o de *hot spots* persistentes, identificado em 14% da área dos centros de densidade populacional dos municípios que constituem o Vale da Felicidade.

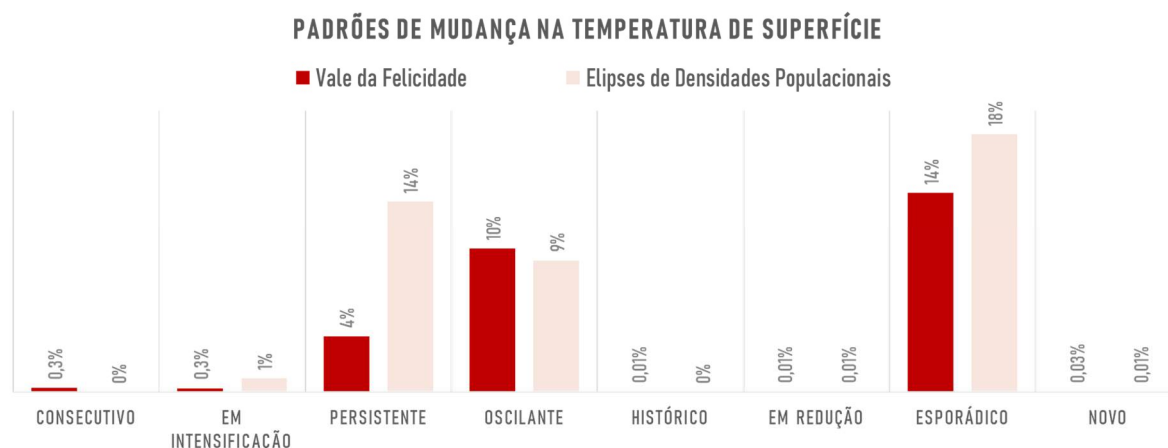


Figura 79: Área percentual dos padrões emergentes de *hot spots* de temperatura superficial.
(Elaborada pela autora, 2022).

A dinâmica espacial das mudanças na temperatura da superfície é exibida na Figura 80. As tendências de aquecimento – como as observadas nos padrões de *hot spots* consecutivos e de *hot spots* persistentes – estão espacialmente agrupadas nos CDPs. Esse padrão pode estar associado à incorporação de materiais de maior capacidade de armazenamento de calor à cobertura do solo, decorrentes de novas construções na área de expansão e de densificação dos núcleos urbanos. Os padrões de *hot spots* oscilantes e esporádicos ocorrem com maior frequência em áreas pouco urbanizadas e com cobertura vegetal mais intensa, assim como nas de produção agrícola, nas quais as temperaturas superficiais estão comumente associadas a variações na umidade, às condições climáticas e ao nível de exposição do solo.

A Tabela 3 apresenta a proporção da área dos CDPs, de cada município, onde ocorrem os diversos padrões emergentes de *hot spots* das temperaturas superficiais. No município de Montenegro, em 58,8% do CDP, foi identificada a ocorrência de *hot spots* persistentes, ao longo do período avaliado. Já, no município de São José do Hortêncio, 9,6% do território do CDP é caracterizado pela ocorrência de *hot spots* em intensificação. Além disso, destacam-se os padrões observados no município de Capela de Santana, caracterizados como *hot spots* esporádicos, em 33,9% da área avaliada, e como *hot spots* persistentes, em 23,3% do mesmo território – tal resultado é um indício de que o contraste observado entre o período inicial e o final (cf. seção 5.3.1.3) ocorre, principalmente, em decorrência de variações na cobertura vegetal.

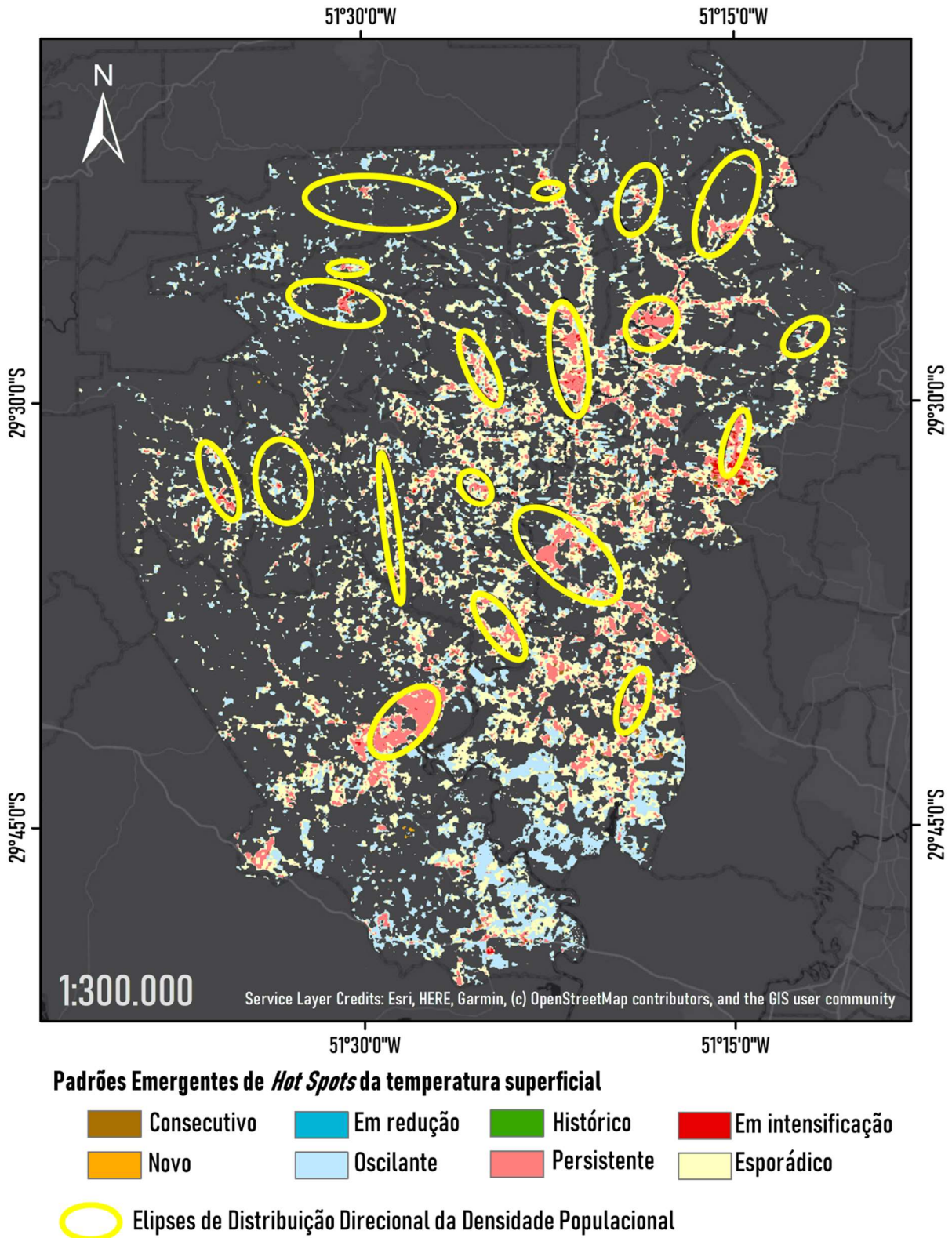






Figura 80: Distribuição espacial dos padrões emergentes de *hot spots* da temperatura superficial.
(Elaborada pela autora, 2022).

Tabela 3 – Proporção da área total associada aos padrões emergentes de hot spot das temperaturas superficiais, nas elipses de densidade populacionais dos municípios do Vale da Felicidade

Município	Padrão emergente de <i>hot spot</i> da temperatura superficial							
	Consecutivo	Em intensificação	Persistente	Oscilante	Histórico	Em redução	Esporádico	Novo
Alto Feliz	-	0,9%	2,7%	0,7%	-	-	11,7%	0,03%
Barão	0,1%	0,1%	0,6%	6,3%	-	-	2,3%	0,1%
Bom Princípio	0,6%	2,3%	25,3%	8,3%	-	-	34,8%	-
Brochier	0,3%	1,8%	8,6%	12,1%	-	-	18,7%	-
Capela de Santana	0,9%	0,6%	23,3%	9,6%	0,1%	0,2%	33,9%	-
Feliz	0,7%	2,3%	28,2%	5,1%	-	-	26,6%	0,02%
Harmonia	1,5%	1,2%	18,0%	13,9%	-	-	42,1%	-
Linha Nova	0,1%	0,7%	3,5%	12,1%	-	-	11,7%	-
Maratá	0,03%	0,2%	1,1%	12,4%	-	-	9,7%	-
Montenegro	0,3%	0,4%	58,8%	5,8%	-	0,01%	14,6%	-
Parei Novo	0,8%	0,2%	14,8%	8,5%	-	-	33,3%	-
Salvador do Sul	0,5%	1,5%	3,6%	11,0%	-	-	7,2%	0,01%
São Pedro da Serra	0,4%	3,2%	13,0%	25,5%	-	-	31,9%	-
São Sebastião do Caí	0,5%	0,5%	13,5%	11,3%	-	0,02%	22,7%	-
São José do Hortêncio	1,1%	9,6%	35,3%	8,3%	-	-	37,6%	-
São José do Sul	0,3%	-	3,9%	10,1%	-	-	25,5%	-
São Vendelino	0,4%	0,4%	5,5%	10,7%	-	-	22,4%	-
Tupandi	0,1%	1,1%	14,0%	13,2%	-	-	32,6%	-
Vale Real	0,1%	0,2%	6,1%	5,2%	-	-	12,2%	-

Legenda: Maior percentual do padrão     Menor percentual do padrão

Fonte: elaborada pela autora, 2022

No que tange a tendências de alterações nos agrupamentos de área construída, não foram identificados padrões significativos de mudanças, em 38% de toda a área do Vale da Felicidade. Em 35% da área total, as tendências do índice de área construída, ao longo do tempo, estiveram associadas aos padrões de *cold spot*, devido à alta cobertura vegetal da área de estudo. As tendências associadas a agrupamentos de altos índices de área construída caracterizam 27% de todo o território.

Nessa perspectiva, a Figura 81 apresenta o percentual da área caracterizada pelos padrões emergentes dos *hot spots* de área construída. Ao longo do período avaliado, as dinâmicas mais

frequentes de alteração da área construída são as de *hot spots* persistentes e esporádicos, caracterizando, respectivamente, 9% e 11% de todo o território do Vale da Felicidade. Tais padrões também são os mais frequentes nos recortes dos CDPs, sendo os agrupamentos de altos valores de NDBI persistentes, presentes em 17% da área dos centros de densidade populacional, e os esporádicos, em 13% do mesmo território. A ocorrência persistente de agrupamentos de altos valores de NDBI caracteriza as áreas construídas, ao passo que a sua ocorrência esporádica está associada a áreas cobertas por vegetação ou de produção agrícola, o que confere maior variabilidade a este índice, ao longo do tempo.

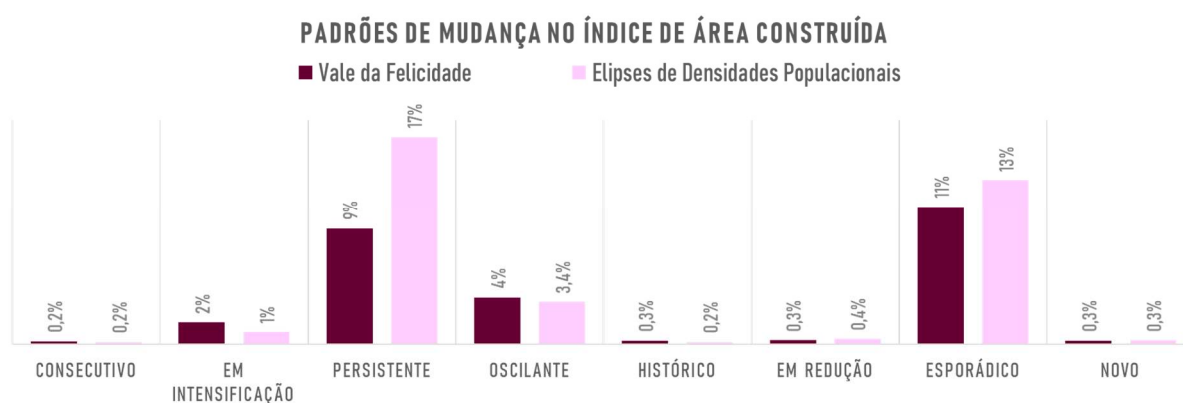


Figura 81: Distribuição, em termos percentuais, dos padrões emergentes de *hot spots* do NDBI (Elaborada pela autora, 2022).

O mapeamento dos padrões emergentes de *hot spots* do NDBI é apresentado na Figura 82. Observa-se que a distribuição espacial das tendências espaço-temporais, para o índice de área construída, guarda uma relação com os padrões de *hot spot* persistentes de temperatura superficial, nos centros de densidade populacional. Em contraposição, na porção sul do mapa, enquanto as mudanças na temperatura superficial estão associadas a padrões oscilantes e esporádicos, o índice de área construída exibe um padrão de *hot spots* persistente e em intensificação, particularmente associado a mosaicos de agricultura e de pastagem. Em tais áreas, fatores como a umidade do solo e o estágio de crescimento da cultura influenciam, tanto na temperatura de superfície, quanto nos índices de NDBI, podendo representar *hot spots* em um contexto no qual a área estudada, como um todo, apresenta valores muito baixos, estando associados às áreas de cobertura florestal.

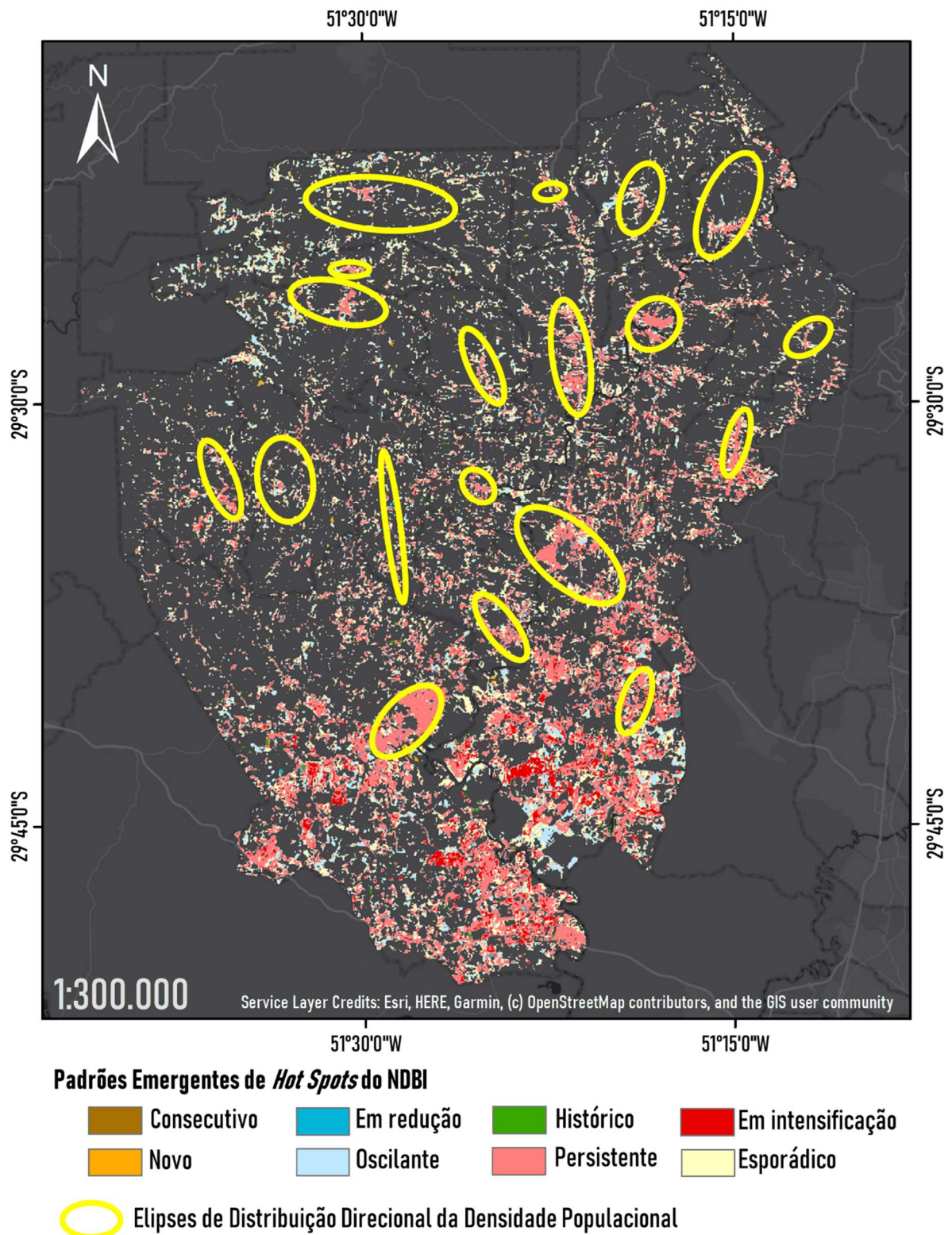


Figura 82: Distribuição espacial padrões emergentes de hot spots do NDBI (Elaborada pela autora, 2022).

A Tabela 4 apresenta a proporção da área caracterizada por padrões emergentes de *hot spot* do NDBI, nas elipses de densidade populacionais dos municípios do Vale da Felicidade. No município de Montenegro, destacadamente, os padrões persistentes de *hot spots* de área construída podem ser observados em 60,7% do CDP, assim como também se identifica uma maior incidência de novos *hot spots* entre os municípios. Já, no município de Capela de Santana, destaca-se a maior incidência de *hot spots* em intensificação, que abrangem 5,9% do território de seu CDP. Em São José do Hortêncio, evidenciam-se os padrões de dinâmica espaço-temporal de aumento no NDBI, associados à ocorrência de *hot spots* consecutivos, em 0,6% da área de seu CDP, e em intensificação, em 4% desta área. Nos municípios de São Vendelino e Vale Real, observam-se as menores incidências de padrões emergentes relacionados à variação no NDBI.

Tabela 4 – Proporção da área total caracterizada por padrões emergentes de *hot spot* do NDBI, nas elipses de densidade populacionais dos municípios do Vale da Felicidade.

Município	Padrão emergente de <i>hot spot</i> do NDBI							
	Consecuti vo	Em intensifica ção	Persistent e	Oscilante	Histórico	Em redução	Esporádico	Novo
Alto Feliz	0,1%	0,3%	4,0%	5,0%	0,01%	0,05%	12,5%	0,3%
Barão	0,3%	0,1%	2,6%	4,6%	-	0,04%	8,0%	0,71%
Bom Princípio	0,1%	1,2%	21,6%	3,3%	0,1%	0,6%	20,5%	0,1%
Brochier	0,1%	0,9%	15,2%	2,8%	0,1%	0,52%	13,5%	0,1%
Capela de Santana	0,03%	5,9%	37,7%	4,3%	0,5%	0,8%	18,1%	0,01%
Feliz	-	0,6%	26,3%	2,7%	-	0,32%	13,6%	0,02%
Harmonia	0,1%	0,8%	24,6%	2,0%	0,4%	0,8%	17,7%	-
Linha Nova	0,51%	0,4%	5,7%	3,6%	-	0,1%	11,9%	0,2%
Maratá	0,2%	0,2%	3,9%	3,7%	0,04%	0,17%	10,1%	0,5%
Montenegro	0,0%	1,6%	60,7%	1,8%	0,21%	0,5%	9,1%	1,1%
Parei Novo	0,2%	1,5%	22,9%	2,5%	0,56%	1,2%	17,9%	0,16%
Salvador do Sul	0,1%	0,4%	8,8%	4,7%	0,03%	0,1%	10,3%	0,4%
São Pedro da Serra	0,3%	1,2%	29,3%	7,3%	-	0,34%	27,2%	0,8%
São Sebastião do Cai	0,3%	1,7%	20,7%	3,0%	0,2%	0,4%	16,1%	0,1%
São José do Hortêncio	0,6%	4,0%	34,4%	2,2%	0,2%	0,3%	28,5%	0,1%
São José do Sul	0,1%	0,3%	11,4%	1,9%	0,91%	1,74%	12,5%	0,1%
São Vendelino	-	0,3%	4,2%	1,8%	-	0,0%	14,4%	-
Tupandi	0,2%	0,8%	10,4%	4,1%	0,21%	0,36%	18,2%	0,1%
Vale Real	0,04%	0,1%	5,8%	2,5%	0,04%	0,11%	8,6%	0,03%

Legenda: Maior percentual do padrão ■ ■ ■ ■ Menor percentual do padrão

Fonte: elaborada pela autora, 2022

A identificação dos padrões emergentes de agrupamentos caracterizados por altas temperaturas superficiais e por altos valores do NDBI permitiu observar as diferentes dinâmicas de mudança, ao longo do tempo. Os resultados obtidos corroboraram com a análise do CDI, acrescentando informações quanto à evolução das variáveis analisadas, ao longo do tempo. Embora o aumento das temperaturas em ambientes urbanos figure entre os impactos relevantes da ação humana para as mudanças climáticas, o desenvolvimento de estratégias de adaptação, apoiadas na análise de dados, ainda permanece fora do escopo do planejamento da maioria das pequenas municipalidades. Em tais locais, entretanto, a implementação de ações para orientar a expansão urbana é mais factível do que em grandes adensamentos populacionais, dado seu estágio ainda incipiente de urbanização, que possibilita, tanto a implantação de uma diversidade de soluções, como, também, a orientação da urbanização em direção a padrões mais sustentáveis, em novos empreendimentos.

Nesse contexto, a cobertura do solo nas áreas urbanas dessas cidades em expansão apresenta composição bastante diversa, com características específicas a cada município, com parcelas de vegetação arbustiva, de vegetação rasteira, de solo exposto e coberta por diferentes materiais construtivos, cuja interação resulta em diferentes tendências espaço-temporais das temperaturas de superfície e das áreas construídas. Nesse viés, os mapeamentos de tais tendências deverão nortear a análise das estruturas internas dessas áreas com classificações detalhadas do tecido urbano, a fim de orientar estratégias de mitigação do calor e de auxiliar no monitoramento do desempenho de medidas já executadas para a adaptação ao clima. Em vista disso, nas próximas seções, propõe-se um caminho metodológico para a análise intraurbana, aplicada aos CDPs, de alguns dos municípios da área de estudo.

5.3.2 Avaliação na Escala Intraurbana

As informações obtidas por meio das imagens do satélite Landsat (cf. seção 5.3.1) se apresentam úteis para a análise da paisagem em escala regional. Entretanto, sua aplicação para a avaliação em menores escalas apresenta algumas limitações. Dessa forma, a combinação de informações, em diferentes escalas, pode auxiliar na compreensão dos padrões de ocupação do solo, também na escala intraurbana, fornecendo indicativos de estratégias que podem ser integradas ao crescimento das cidades. Em vista disso, a avaliação proposta nesta seção, em escala intraurbana, buscou avaliar os centros de densidade populacional de alguns municípios constituintes do Vale da Felicidade. Para tanto, entende-se que as imagens do satélite sino-

brasileiro CBERS-4A constituem uma fonte de dados adequada para a escala de avaliação proposta, visto que é possível alcançar a resolução espacial de 2 metros, em suas bandas espectrais.

Para fins de classificação do uso e cobertura do solo, foram consideradas as respostas espectrais dos diferentes materiais que constituem a paisagem. Tal classificação, além de possibilitar quantificar e localizar os diferentes usos do solo, fornece subsídios para que sejam interpretadas suas funções. De acordo com Lang e Blaschke (2009), as funções estão relacionadas ao objetivo dos processos que ocorrem em uma paisagem. Assim, em seu sentido sistêmico, a função pode ser entendida como a passagem de grandezas de entrada, para grandezas de saída, transformadas. Além disso, as características funcionais da paisagem podem ser observadas a partir das seguintes perspectivas: ecologicamente – função de habitat, de proteção, de regulação, de desenvolvimento e de recuperação; social e economicamente – função de informação, de moradia, de lazer e de produção. As medidas de estrutura da paisagem podem, desta forma, auxiliar no processo de descoberta de relações causais, entre os padrões e os processos em andamento na paisagem, desempenhando um papel decisivo no planejamento ecológico e no direcionamento de ações, de forma proativa e prospectiva.

O reconhecimento da existência de uma dependência espacial entre as unidades da paisagem é o ponto central desse tipo de análise, em razão de o funcionamento de uma unidade depender das interações que ela mantém com as demais unidades. Logo, a ecologia de paisagens pode ser entendida como “uma combinação de uma análise espacial da geografia, com um estudo funcional da ecologia” (METZGER, 2001, p. 5).

Portanto, a análise da paisagem é, no presente trabalho, realizada por meio do cálculo e da avaliação de algumas métricas selecionadas. Nesse sentido, a interpretação adequada dessas métricas pode auxiliar na compreensão da complexidade da paisagem urbana, considerando relações entre sua estrutura e suas funções.

5.3.2.1 Detalhamento da Metodologia

Nesta seção, foram selecionados, como área de estudo, os municípios constituintes do Vale da Felicidade, cujos CDPs apresentaram maior compacidade. Para tanto, admitiu-se, como medida de compacidade da ocupação do território, a relação entre os eixos das elipses de distribuição direcional das densidades populacionais, em cada município. Dessa forma, selecionou-se os

seis municípios cuja relação entre os eixos mais se aproxima de uma relação unitária, conforme ilustrado na Figura 83, sendo eles: Feliz, Maratá, Montenegro, Alto Feliz, Harmonia e Vale Real.

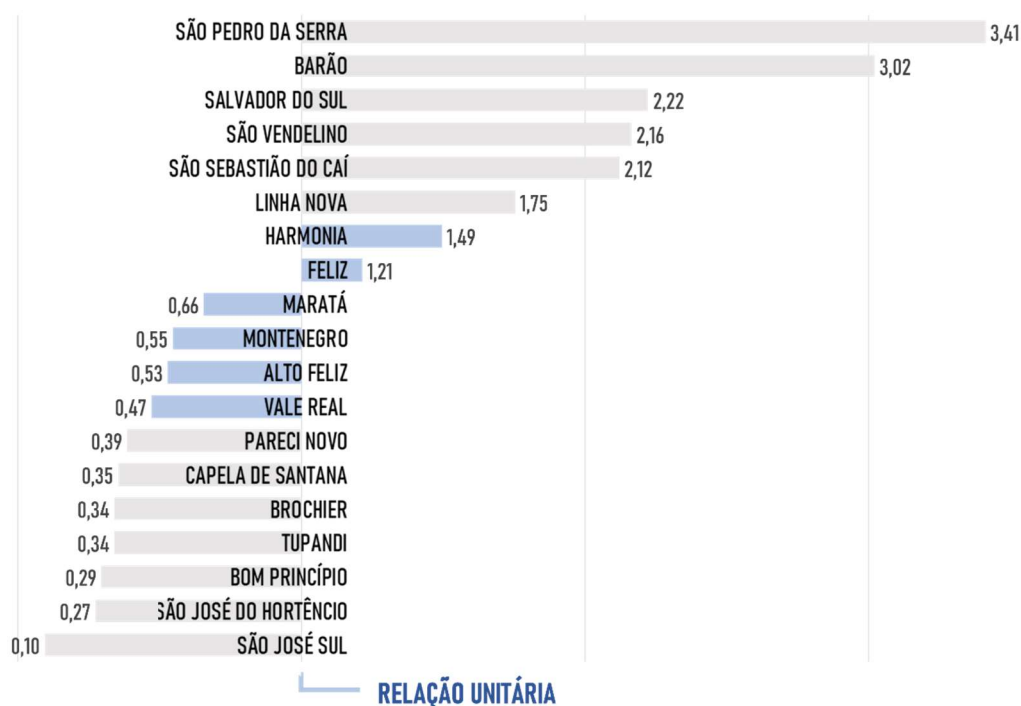


Figura 83: Proximidade à relação unitária, entre os eixos das elipses de distribuição direcional das densidades populacionais, dos municípios do Vale da Felicidade. (Elaborada pela autora, 2022)

É importante ressaltar que o critério de seleção tem o objetivo de eleger os municípios, dentro da área de estudo, que tenham resultados que possam ser melhor visualizados e explorados. Tal critério não deve ser entendido, no entanto, como limitador para a aplicação da metodologia, sendo ele replicável para a análise de qualquer municipalidade, dentro do território brasileiro.

O método empregado levou em consideração informações gratuitamente disponíveis. Assim, para a avaliação intraurbana, considerando-se o nível de detalhamento espacial requerido, foram utilizadas imagens do sensor WPM, do satélite sino-brasileiro CBERS-4A, disponíveis no catálogo de imagens do Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais²⁰. Nesse viés, três

²⁰ Disponíveis em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 21 de mai de 2021.

critérios foram utilizados para a seleção da imagem: abranger os centros de densidade populacional dos seis municípios selecionados para o presente estudo; apresentar baixa cobertura de nuvens nas áreas a serem avaliadas; e representar a situação atual do uso e da cobertura do solo, na região. Considerando esses critérios, elegeu-se a imagem obtida pelo sensor, no dia 21 de abril de 2021, órbita 207 e ponto 150.

Realizou-se uma composição das imagens referentes às bandas do azul (faixa de comprimento de onda entre 0,45 e 0,52 μm), do verde (faixa de comprimento de onda entre 0,52 e 0,59 μm), do vermelho (faixa de comprimento de onda entre 0,63 e 0,69 μm) e do infravermelho próximo (faixa de comprimento de onda entre 0,77 e 0,89 μm), resultando em um *raster* de múltiplas bandas. Tal *raster* apresenta a resolução espacial de 8 m, a mesma das bandas que o compõe. Outrossim, para o refinamento da escala espacial, aplicou-se a técnica de *pan-sharpening*, a qual consiste na combinação dos detalhes de alta resolução presentes na banda pancromática, de resolução de 2 m, com a informação, em cores, das demais bandas de menor resolução. Na escala de análise intraurbana, uma imagem de resolução espacial mais detalhada possibilita a identificação de características, ou de fenômenos espaciais, não-identificáveis em outras resoluções. Na sequência, coletou-se segmentos para amostras representativas dos diferentes tipos de uso e cobertura do solo, em número estatisticamente significativo. As amostras foram separadas em dois grupos: o primeiro, destinado ao treinamento do algoritmo de classificação; o segundo, no intuito de validar a classificação realizada.

Para fins de classificação, foram consideradas as seguintes classes: Pavimentação, Urbanização Clara, Urbanização Escura, Vegetação Arbustiva, Vegetação Rasteira, Solo Exposto e, quando presentes, Rios e Lagoas. É importante destacar que as imagens utilizadas, ainda que apresentem alta resolução espacial, possuem uma resolução espectral limitada. Sendo assim, algumas classes precisaram ser subdivididas, para aumentar a eficácia do processo de classificação, uma vez que a resposta espectral de alguns materiais, ainda que pertencentes à mesma classe, apresenta distinções significativas. Por exemplo, a classe Água foi subdividida em **Lagoas** e **Rios**; e a classe Área Urbanizada foi considerada como composta por **Área Urbanizada Clara** e **Área Urbanizada Escura**. Para as análises realizadas em continuidade, essas classes foram reagrupadas.

Em relação à classificação do uso e cobertura do solo, utilizou-se o classificador paramétrico da **Máxima Verossimilhança**, que, em linhas gerais: i) assume que as amostras de treinamento, em cada classe, resultam de um modelo de distribuição normal; ii) caracteriza cada classe, de

acordo com essa distribuição; iii) classifica cada pixel, integrando-o à classe com características mais semelhantes. Na sequência, as amostras selecionadas para a validação da classificação são utilizadas para o cálculo da taxa de validação cruzada, que indica a porcentagem de acerto da classificação.

Complementarmente, foram calculadas diversas métricas da paisagem, por meio do software Fragstat v4.2 (MCGARIGAL et al., 2012). O cálculo das métricas baseou-se na regra de vizinhança de 8 células, em que são incluídas no cálculo, além das adjacências horizontal e vertical de cada pixel, a sua adjacência diagonal. O uso e cobertura do solo foi reclassificado, de acordo com suas principais características funcionais, nas seguintes classes: Área Urbana e Pavimentação; Vegetação Arbustiva; Solo Exposto e Vegetação Rasteira; e Água.

Nessa perspectiva, realizou-se a análise da paisagem, com base em métricas obtidas em nível da paisagem, das classes de uso e cobertura do solo e das manchas – ou *patches*. As métricas calculadas, em cada escala de análise, estão apresentadas na Figura 84.

<p>MANCHAS</p> 	<p>ESCALA DE ANÁLISE</p> <p>Menores elementos individuais observáveis na paisagem. Unidade básica para a análise da paisagem.</p>	<p>MÉTRICAS</p> <p>Área (AREA); Perímetro (PERIM); Relação Perímetro-Área (PARA); Índice de Dimensão Fractal (FRAC); Índice de Contiguidade (CONTIG); Distância Euclidiana do Vizinho mais Próximo (ENN).</p>
<p>CLASSES</p> 	<p>ESCALA DE ANÁLISE</p> <p>Configuração de todas as manchas dentro de uma mesma classe.</p>	<p>MÉTRICAS</p> <p>Número de Manchas (NP); Índice de Maior Mancha (LPI); Densidade de Manchas (PD).</p>
<p>PAISAGEM</p> 	<p>ESCALA DE ANÁLISE</p> <p>Composição de todas as manchas que constituem a paisagem.</p>	<p>MÉTRICAS</p> <p>Número de Manchas (NP); Área Média das Manchas (AREA_MN); Relação Perímetro-Área (PARA_MN); Índice de Dimensão Fractal (FRAC_MN); Índice de Contiguidade (CONTIG_MN); Índice de Uniformidade de Shannon (SHEI).</p>

Figura 84: Métricas calculadas, nas diferentes escalas de análise.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em Lang e Blaschke, 2009, e MCGARIGAL et al., 2012)

Pode-se perceber que o número de manchas (NP) que constituem a paisagem, nos CDPs dos municípios avaliados, foi quantificado em sua totalidade e, também, por classe de uso e cobertura do solo. Por outro lado, a área (AREA) e o perímetro (PERIM) das manchas foram quantificados em termos absolutos. O limite inferior de tais métricas está associado à escala do dado utilizado como base para o cálculo, que, no presente estudo, é de 4 m² de área e de 8 metros de perímetro, decorrentes da resolução das imagens utilizadas. No caso da paisagem, é calculada a área média (AREA_MN) das manchas que a constitui. A Relação Perímetro/Área (PARA) foi calculada para todas as manchas, com a utilização da Equação 36. A métrica representa uma medida simples de complexidade da forma (MCGARIGAL et al., 2012).

$$PARA = \frac{PERIM_{ij}}{AREA_{ij}} \quad \text{Equação 36}$$

No que concerne ao Índice de Dimensão Fractal (FRAC), ele foi calculado com a utilização da Equação 37, para todas as manchas. Esse índice varia de 1, quando a forma da mancha se aproxima da geometria euclidiana; até 2, com valores crescentes, à medida que as formas se tornam mais complexas (MCGARIGAL et al., 2012).

$$FRAC = \frac{2 \times \ln(0,25 \times PERIM_{ij})}{\ln(AREA_{ij})} \quad \text{Equação 37}$$

Por meio do Índice de Contiguidade (CONTIG), é possível verificar a conectividade espacial, dentro de uma mesma mancha, avaliando sua configuração. A contiguidade da mancha é calculada pela Equação 38. O procedimento de cálculo é ilustrado em uma mancha hipotética, na Figura 85. Os valores do índice variam de 0 a 1, podendo o seu valor identificar a ocorrência de grandes manchas contíguas (valores próximos a 1), ou a existência de manchas pequenas e fragmentadas (valores mais próximos a 0), segundo Lagro (1991) e Mcgarigal et al. (2012). À vista disso, o valor médio do Índice de Contiguidade (CONTIG) foi utilizado como métrica de contiguidade, em nível da paisagem.

$$CONTIG = \frac{\left[\frac{\sum_{r=1}^z c_{ijr}}{a_{ij}^*} \right] - 1}{v - 1} \quad \text{Equação 38}$$

em que c_{ijr} é o valor de contiguidade do píxel r , na mancha ij , calculado conforme valores atribuídos em uma janela móvel de 3 x 3 píxeis; v é a soma de todo os valores, em uma janela

móvel de 3 x 3 píxeis, equivalente a 13, dadas as considerações admitidas e apresentadas na Figura 85; e α_{ij}^* é o número de píxeis da mancha.

Janela móvel 3 x 3 píxeis $v = 13$				Mancha $\alpha_{ij}^* = 10$ píxeis $C_{ijr} = 4 + 6 + 10 + 8 + 9 + 13 + 9 + 6 + 9 + 6 = 80$			
1	2	1	O valor do píxel central é 1				4
2	1	2	O valor do píxel na janela 3x3 é 1, se pertencente à mesma classe e posicionado em posição diagonal.		6	10	8
1	2	1	O valor do píxel da janela 3x3 é 2, se pertencente à mesma classe e posicionado horizontal ou verticalmente.		9	13	9
			O valor do píxel na janela 3x3 é 0, se não pertencente a mesma classe.		6	9	6

Figura 85: Procedimento de cálculo do Índice de Contiguidade.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em Lagro, 1991)

Como medida de agregação, calculou-se a Distância Euclidiana do Vizinho mais Próximo (ENN), que mede a proximidade entre fragmentos da mesma classe, com base na distância mais curta, de ponta a ponta (MCGARIGAL et al., 2012). Dentro de amostras de formas urbanas, a métrica pode atuar, também, como um *proxy* para conectividade.

Em relação ao nível das classes, a agregação foi avaliada pela densidade de manchas (PD), calculada pela Equação 39. A métrica é definida pelo número de remendos por unidade de área, o que facilita as comparações entre paisagens de tamanho variável (MCGARIGAL et al., 2012).

$$PD = \frac{NP_i}{A} \times 10.000 \times 100 \quad \text{Equação 39}$$

em que, NP_i é o número de manchas da classe i ; e A é a área total da paisagem em análise.

Para cada classe, foi calculado, conforme a Equação 40, o Índice de Maior Mancha (LPI), que identifica a porcentagem da paisagem, relativamente à maior mancha de cada classe (MCGARIGAL et al., 2012):

$$LPI = \frac{\max(AREA_{ij})}{A} \times 100 \quad \text{Equação 40}$$

em que $AREA_{ij}$ é a área da maior mancha de cada classe; e A é a área total da paisagem em análise.

Em nível da paisagem, além das médias já referidas, calculou-se o Índice de Uniformidade de Shannon, conforme a Equação 41. Tal índice expressa a similaridade das proporções de área de cada classe da paisagem, variando de 0 a 1, à medida que a uniformidade da distribuição aumenta (MCGARIGAL et al., 2012).

$$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (P_i \times \ln P_i)}{\ln m} \quad \text{Equação 41}$$

em que, P_i é a proporção da paisagem ocupada pela classe i ; e m é o número de classes presentes na paisagem.

5.3.2.2 Mapeamento das Classes de Uso e Cobertura do Solo e Análise da Paisagem

Ao receber a energia solar, os diversos materiais que constituem a paisagem terrestre respondem de maneira distinta: essa energia é absorvida, refletida e transmitida, em diferentes níveis, a depender das propriedades dos materiais. Uma vez identificado o padrão de refletância de cada classe de uso e de cobertura do solo, é possível quantificá-las e localizá-las espacialmente.

Isto posto, na Figura 86, é apresentado o comportamento médio, em termos de refletância, observado em cada classe de uso e cobertura do solo, nos seis municípios analisados, ao serem irradiados com ondas, de diferente comprimento, da faixa do espectro eletromagnético, entre 0,45 e 0,89 μm . Observa-se um padrão de resposta característico, para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo, nos diferentes municípios, em razão deste comportamento ser intrínseco aos materiais que comumente constituem tais classes.

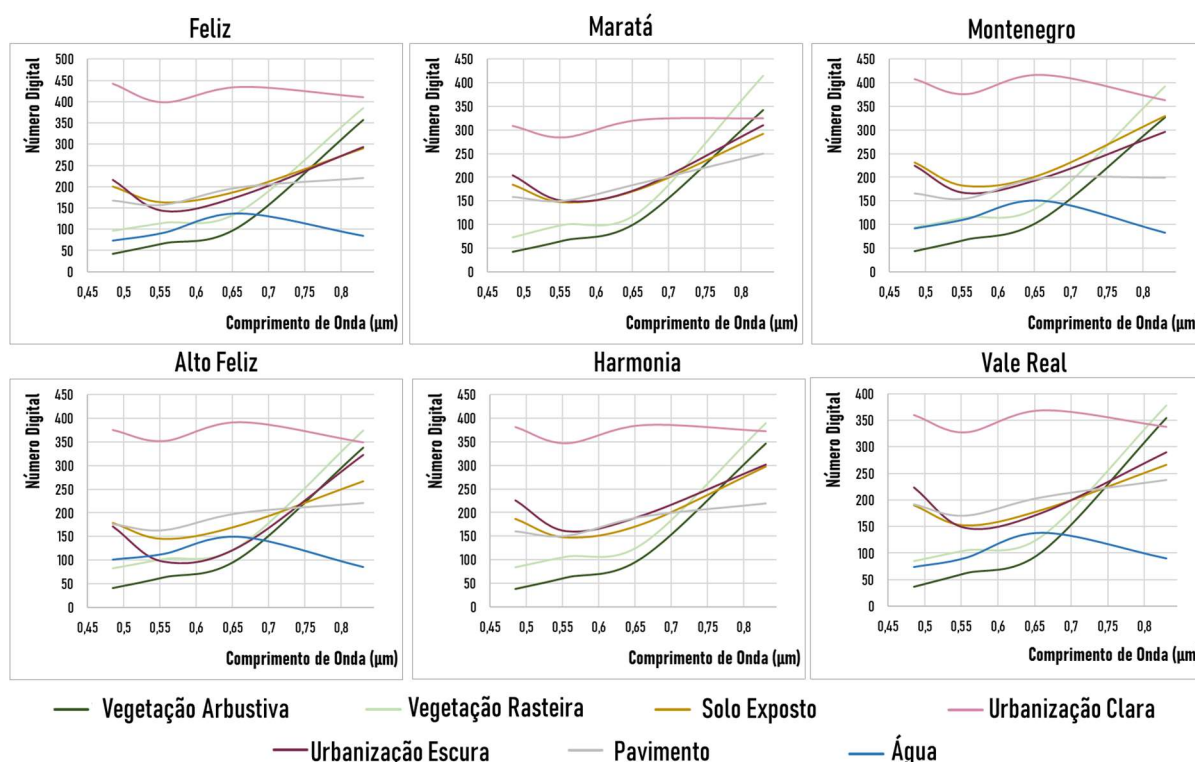


Figura 86: Assinatura espectral das classes de uso e cobertura do solo, nos municípios de Feliz, Maratá, Montenegro, Alto Feliz, Harmonia e Vale Real.

(Elaborada pela autora, 2022)

A resposta espectral significativamente diferente entre os materiais classificados como Urbanização Clara e Urbanização Escura é evidenciada nos gráficos. A Vegetação Rasteira e a Vegetação Arbustiva apresentam um comportamento de refletância similar, em que a principal diferença é observada nos níveis dos números digitais, que apresentam valores superiores para a vegetação rasteira, cuja refletância da radiação é comparativamente maior. Em contrapartida, a resposta espectral das classes de Solo Exposto e Urbanização Escura são semelhantes. Entretanto, ainda que identificada a semelhança espectral, foi possível mapear, com bom nível de confiabilidade, o uso e cobertura do solo, em todos os municípios avaliados.

Na Figura 87, exibe-se o mapeamento do uso e cobertura do solo, no CDP do município de Feliz. A taxa de acerto da validação cruzada, para esse recorte, foi de 91,9%. A área de estudo tem como classe predominante a Vegetação Arbustiva, que cobre 45,1% da área total. As áreas de maior antropização (Área Construída e de Solo Exposto) somam 23,8% da área total. Além disso, os gradientes de densidade (cf. seção 5.1.2) indicaram a forte relação entre a comunidade do município e os seus recursos hídricos, uma vez que a ocupação resultou do acompanhamento

do curso do rio Caí, que exerce centralidade, em termos de concentração, na distribuição das densidades. Também em termos de composição da paisagem, o rio exerce uma grande influência, em que, dos municípios avaliados, Feliz é o que apresenta uma maior participação da classe água, que compõe 3,3% da área total deste recorte.

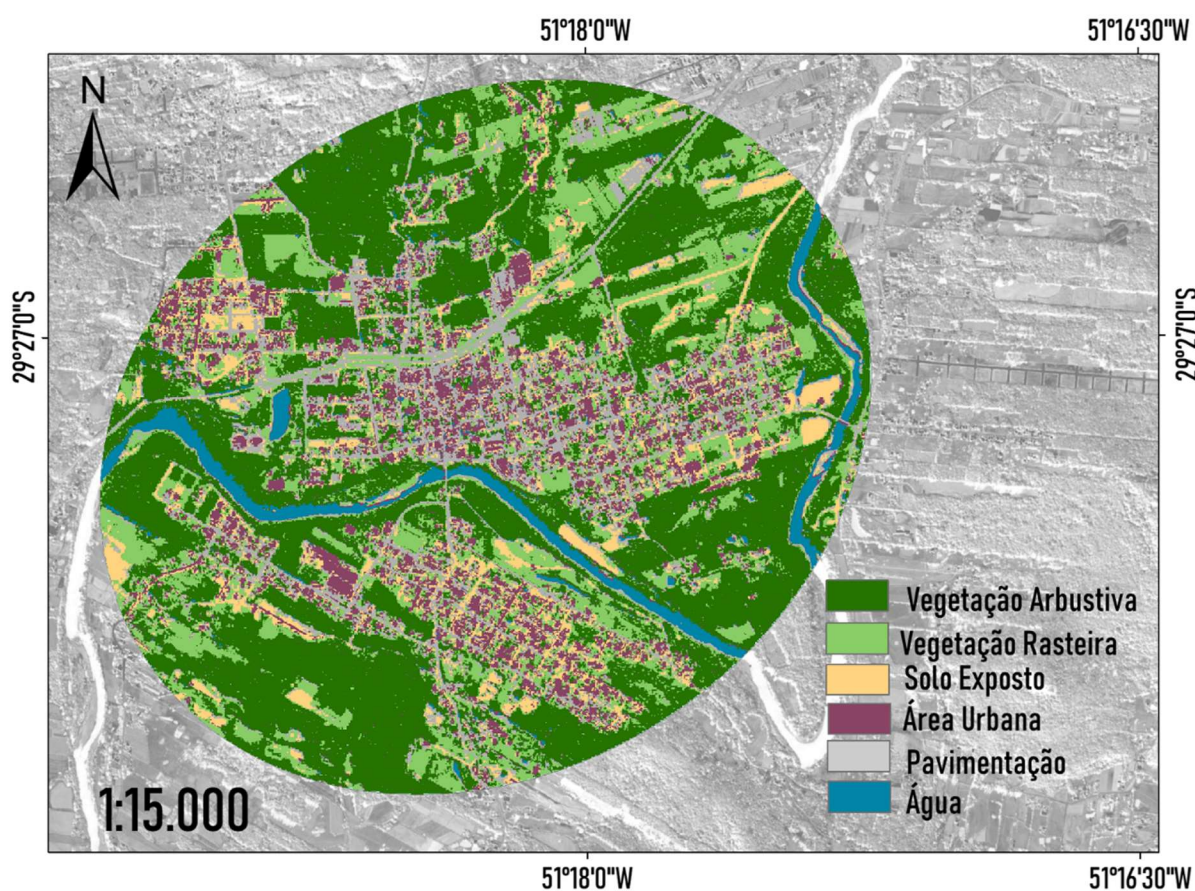


Figura 87: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Feliz/RS.
(Elaborada pela autora, 2022)

Na Figura 88, apresenta-se o mapeamento das classes de uso e cobertura do solo, no CDP do município de Maratá. A validação cruzada das amostras, neste recorte, apresentou uma taxa de acerto de 92,5%. Em 56,0% da área total deste recorte, a cobertura terrestre é composta por Vegetação Arbustiva. Já, em uma área de 25,7% da área total, a cobertura é composta por Vegetação Rasteira, em função do estágio de crescimento inicial, em áreas de produção agrícola, no momento da aquisição da imagem. Entre os municípios avaliados, Maratá

apresentou a menor proporção de áreas de alta antropização, pois as áreas das classes Área Construída e Pavimentação somam apenas 3,9% da área total.

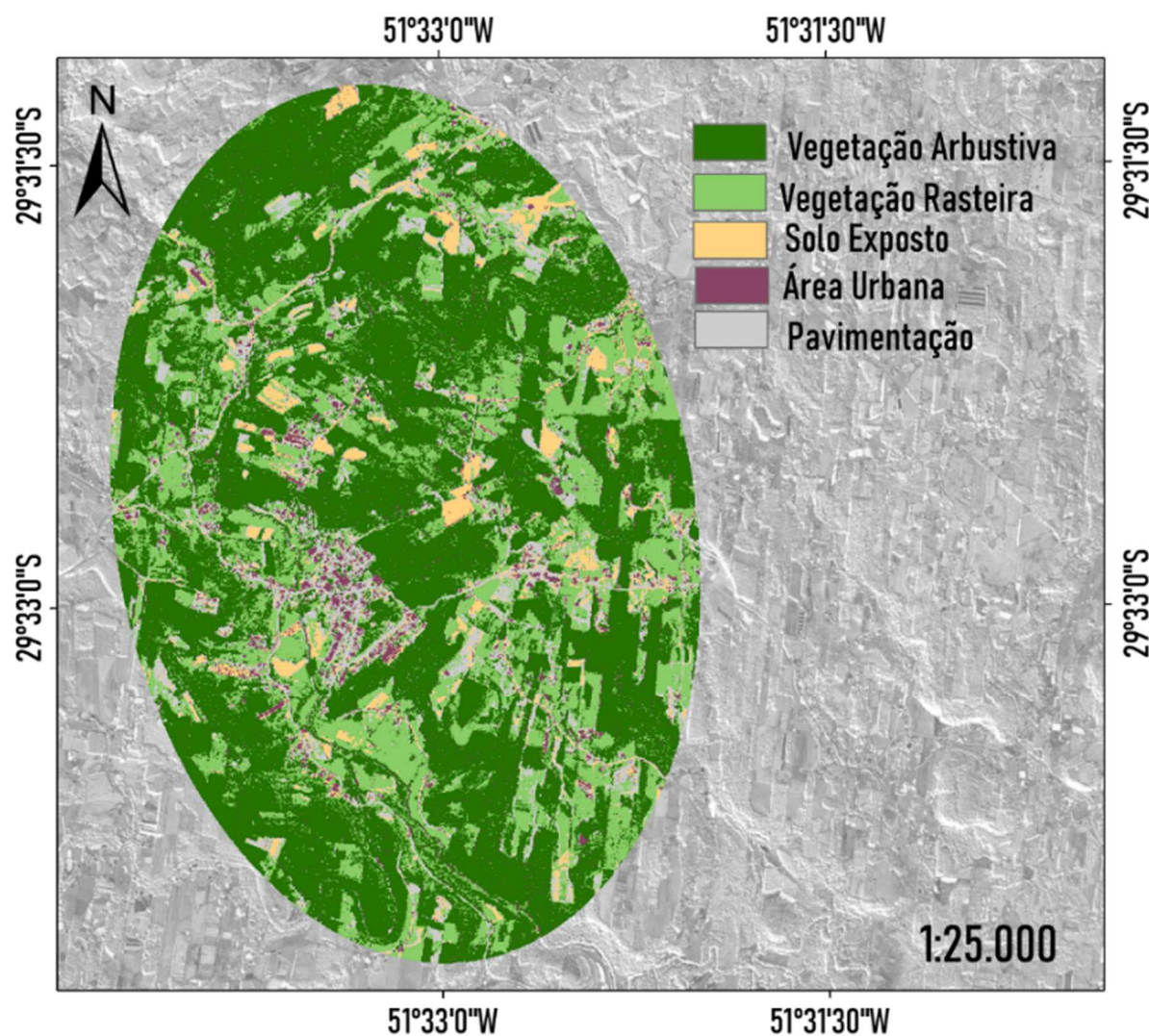


Figura 88: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Maratá/RS.
(Elaborada pela autora, 2022)

A Figura 89 ilustra o mapeamento do uso e cobertura do solo, no CDP do município de Montenegro, em que a taxa de acerto da validação cruzada foi de 90,9%. O município em questão apresenta o maior índice de urbanização, entre os municípios avaliados, sendo as classes de Área Construída e de Pavimentação responsáveis pela cobertura de 38,5% da área

total. Além disso, o município ostenta a menor cobertura pela classe de Vegetação Arbustiva, que representa apenas 26,0% da área total do recorte.

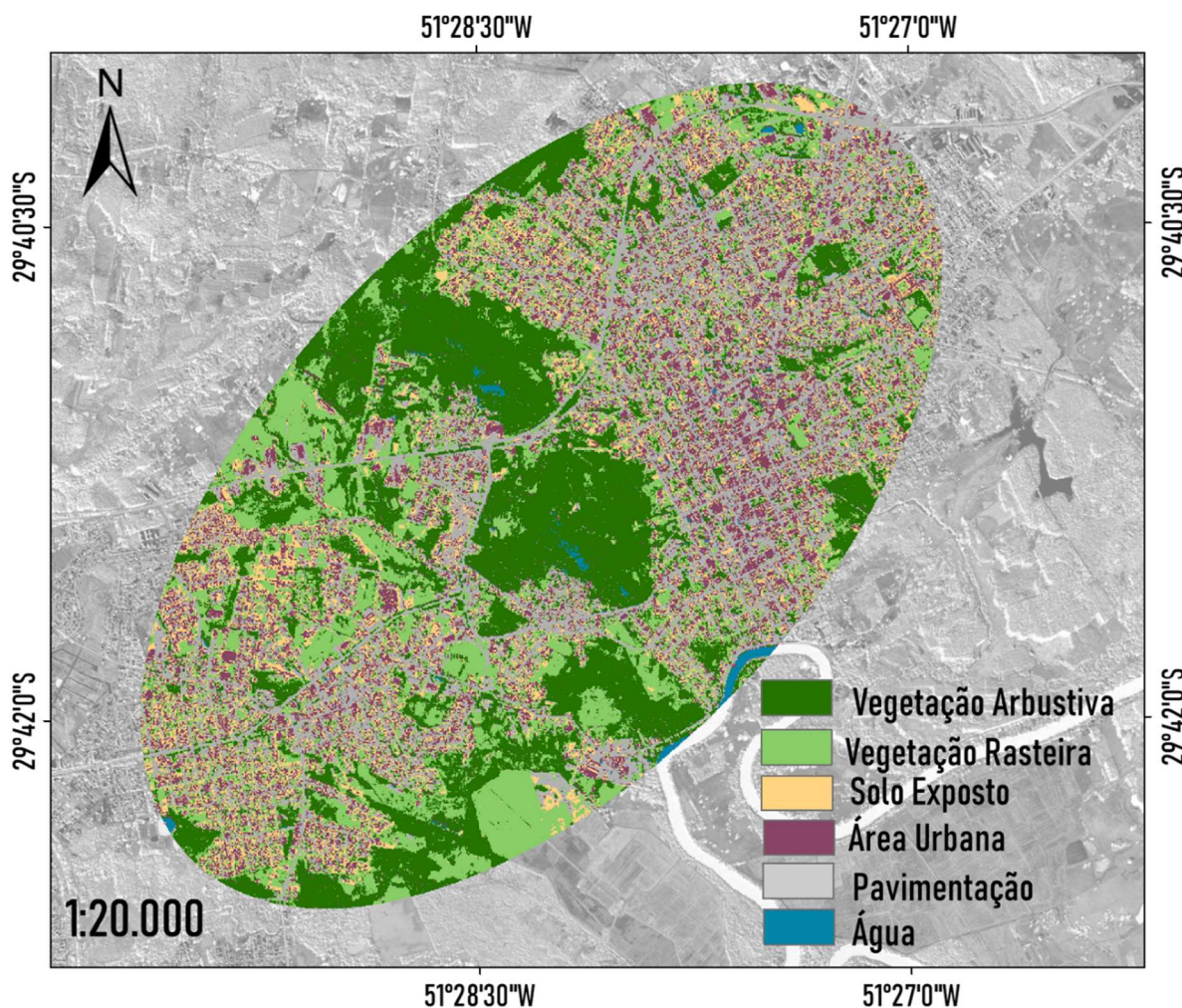


Figura 89: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Montenegro/RS.
(Elaborada pela autora, 2022)

Na sequência, a Figura 90 apresenta o mapa de uso e cobertura do solo, no CDP do município de Alto Feliz, em que a taxa de acerto da validação cruzada foi de 90,5%. Neste recorte, a classe de Vegetação Arbustiva também é predominante, cobrindo 60,5% da área total. Já, as parcelas de alta antropização (Área Construída e Pavimentação) somam 14,8% da área total, que se apresenta espacialmente dispersa. As áreas de Vegetação Rasteira e o Solo Exposto estão,

predominantemente, associadas aos diferentes estágios da produção agrícola, relevante no contexto do recorte.

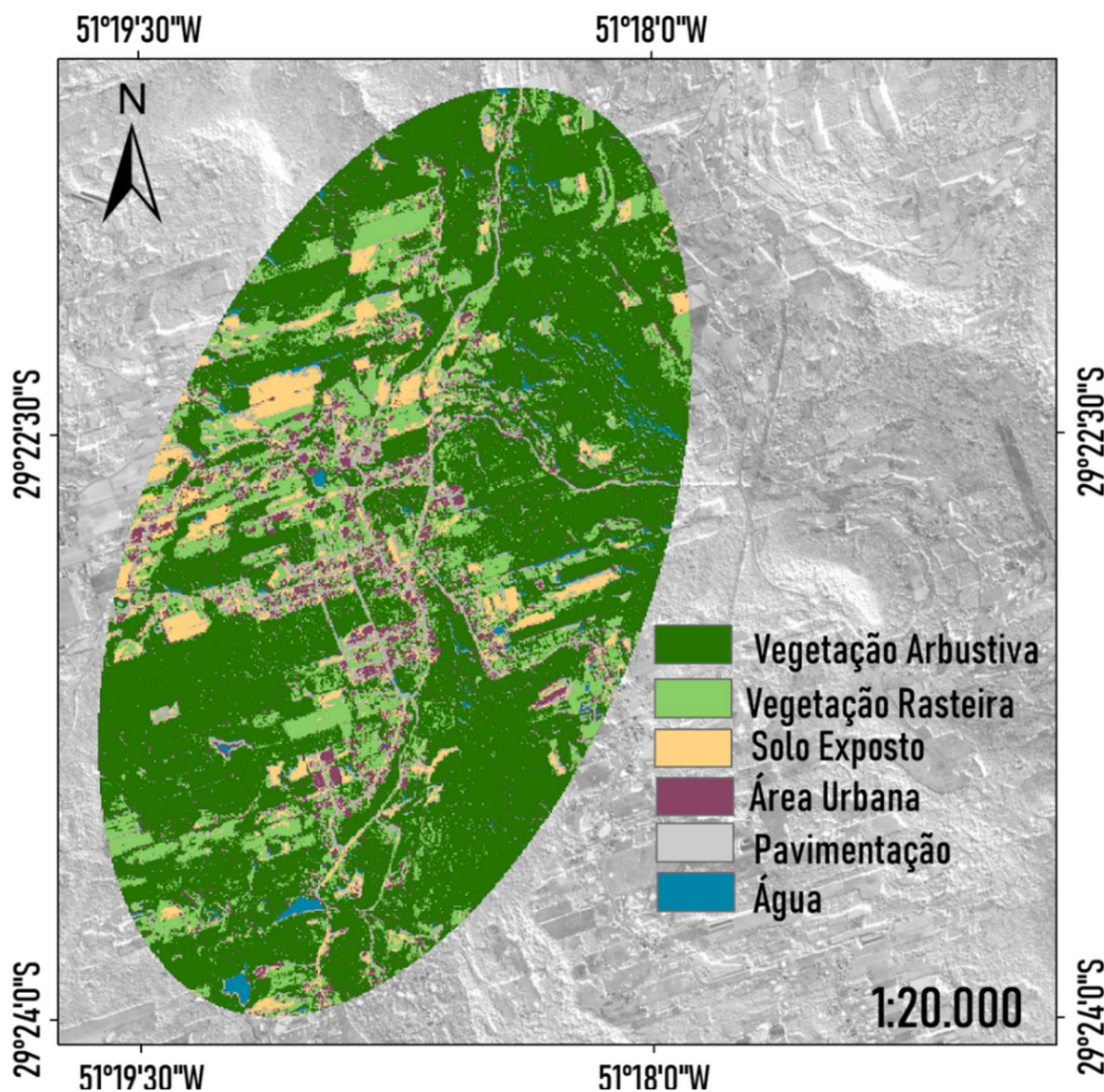


Figura 90: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Alto Feliz/RS.

(Elaborada pela autora, 2022)

No tocante ao município de Harmonia, a Figura 91, a seguir, identifica o mapa de uso e cobertura do solo, no CDP desta localidade, em que a taxa de acerto da validação cruzada representou 92,2%. Quando somadas, as classes de Área Construída e Pavimentação alcançam 22,1% da área total do recorte. Assim, a urbanização no município mostra-se,

comparativamente às dos demais municípios, mais compacta. Em 41,1% dessa área total, a cobertura do solo é representada pela classe de Vegetação Arbustiva. As áreas de Solo Exposto e de Vegetação Rasteira estão incluídas, tanto no ambiente urbano, como também em áreas periféricas de produção agrícola, em estágios iniciais de crescimento.

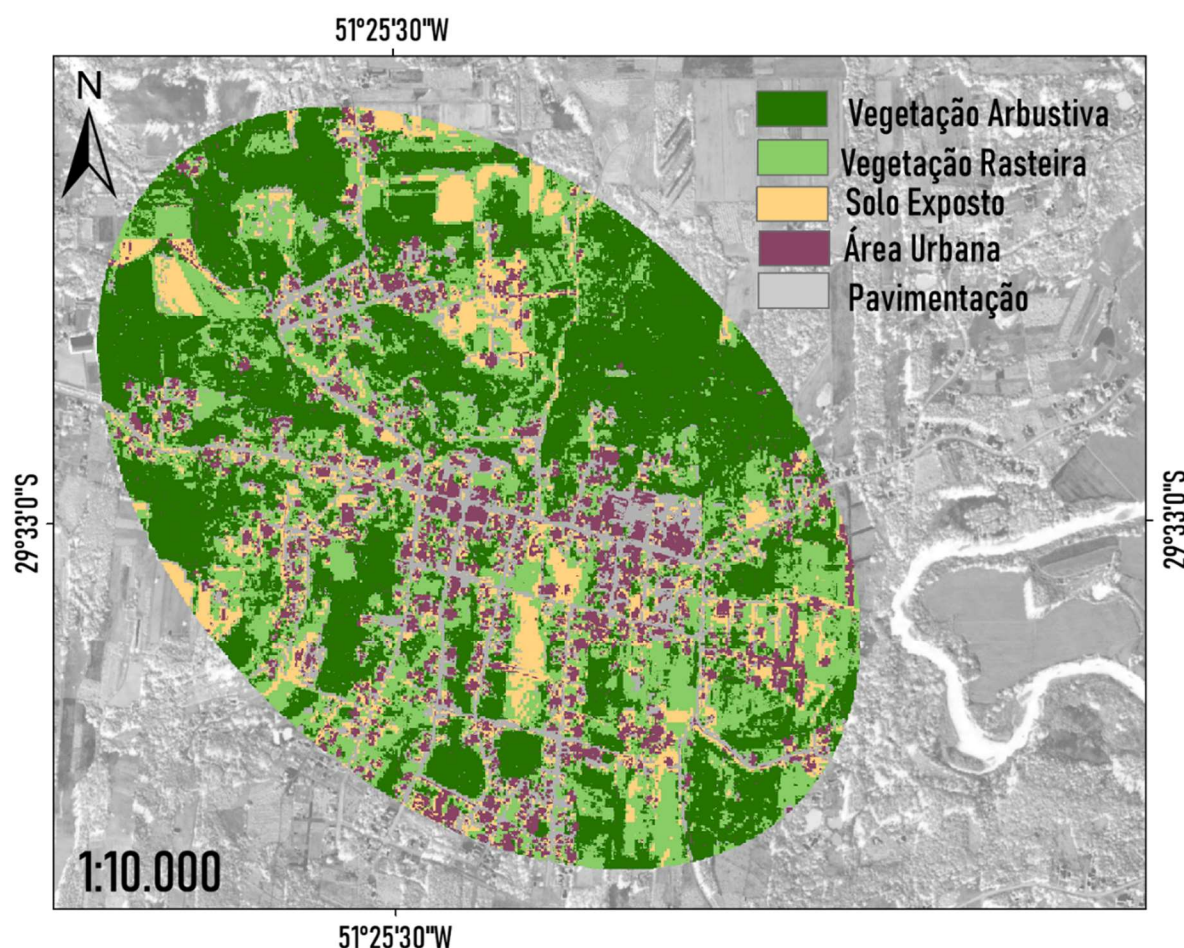


Figura 91: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Harmonia/RS.

(Elaborada pela autora, 2022)

O mapeamento do uso e cobertura do solo, no CDP do município de Vale Real, é identificado na Figura 92. Nesta localidade, a taxa de acerto da validação cruzada foi de 96,2%. A elipse de distribuição direcional, ao englobar, tanto o núcleo principal ao sul, quanto as áreas de ocupação dispersas ao norte, abrange uma expressiva área intermediária, constituída, principalmente, pela classe de Vegetação Arbustiva. Em vista disso, a referida classe é predominante na paisagem, correspondendo a 64,6% da área total do recorte.

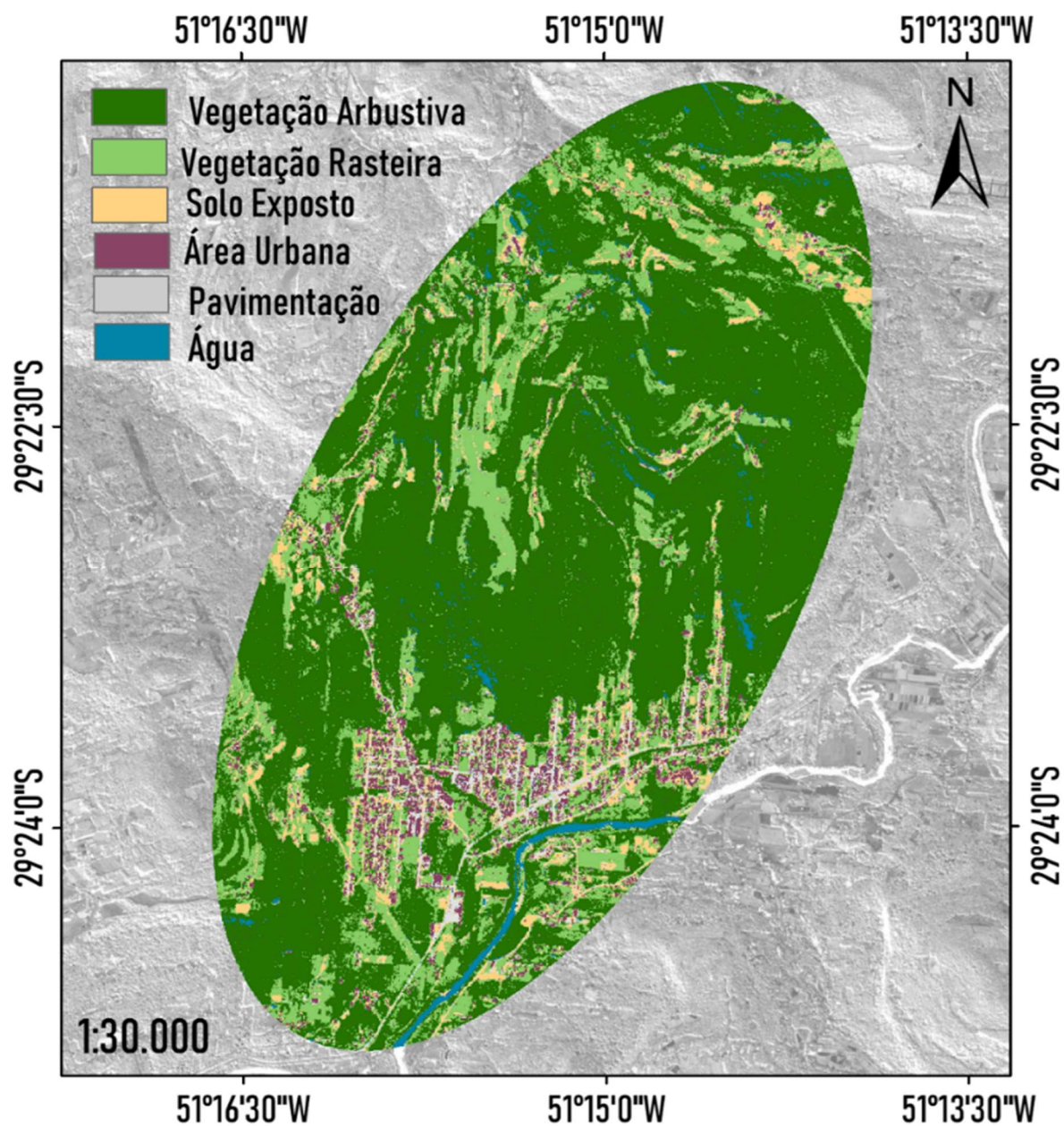


Figura 92: Uso e cobertura do solo, no CDP, no município de Vale Real/RS.
(Elaborada pela autora, 2022)

Para melhor visualização das informações supracitadas, a Tabela 5, a seguir, compreende as áreas correspondentes a cada classe, de cada município, tanto em hectares, quanto em porcentagem da área total do recorte de cada município.

Tabela 5 – Área das classes de uso e cobertura do solo.

Município		Vegetação Arbustiva	Vegetação Rasteira	Solo Exposto	Área Construída	Pavimen- tação	Água
Feliz	Área (ha)	368,8	157,8	70,7	89,1	105,5	26,5
	Área (%)	45,1%	19,3%	8,6%	10,9%	12,9%	3,2%
Maratá	Área (ha)	884,6	405,7	73,2	57,7	162,6	-
	Área (%)	55,9%	25,6%	4,6%	3,6%	10,3%	-
Montenegro	Área (ha)	368,3	297,6	172,7	223,7	304,6	6,8
	Área (%)	26,8%	21,7%	12,6%	16,3%	22,2%	0,5%
Alto Feliz	Área (ha)	533,9	150,0	58,4	54,0	77,0	9,4
	Área (%)	60,5%	17,0%	6,6%	6,1%	8,7%	1,1%
Harmonia	Área (ha)	129,5	80,7	35,5	33,2	36,5	-
	Área (%)	41,1%	25,6%	11,2%	10,5%	11,6%	-
Vale Real	Área (ha)	1253,8	383,3	105,7	98,0	70,2	28,6
	Área (%)	64,6%	19,8%	5,4%	5,1%	3,6%	1,5%

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

5.3.2.3 Métricas da Paisagem

Os centros de densidade populacional dos municípios avaliados se destacam por apresentarem uma apreciável diversidade, em termos de classes de uso, de formas, de tamanhos e de complexidade de padrões. Para qualificar e quantificar essas áreas, são apresentadas, na Tabela 6, algumas métricas, em nível da paisagem local. Nesse nível de análise, sintetiza-se as características de toda a paisagem, em um valor médio.

Tabela 6 – Métricas de paisagem, em nível da paisagem.

Município	Número de Manchas por área	Área Média da Mancha	Dimensão Fractal Média	Índice de Contiguidade Médio	Índice de Uniformidade de Shannon
	<i>un./ha</i>	<i>m²</i>	<i>1 a 2</i>	<i>0 a 1</i>	<i>0 a 1</i>
Feliz	27,0	370,00	1,1	0,3	0,84
Maratá	29,9	335,00	1,1	0,3	0,87
Montenegro	28,2	354,00	1,1	0,3	0,80
Alto Feliz	29,6	338,00	1,1	0,3	0,70
Harmonia	30,1	332,00	1,1	0,3	0,97
Vale Real	29,2	343,00	1,1	0,2	0,65

Fonte: elaborada pela autora, 2022.

Tanto o número de manchas por área, quanto a área média das manchas, apresentam um padrão médio similar, em todos os municípios. Nesse contexto, destaca-se o município de Feliz, que apresenta a menor fragmentação em sua estrutura, uma vez que as manchas têm a maior área média e, conseqüentemente, um menor número de manchas por área. Sob outra perspectiva, o Índice de Dimensão Fractal é, também, semelhante, em todos os municípios. O seu valor indica a prevalência de formas menos complexas, próximas à geometria euclidiana. Em relação à fragmentação da paisagem, essa pode ser identificada pelos valores relativamente baixos do Índice de Contiguidade, sendo o município de Vale Real aquele que apresentou, em média, manchas menores e mais fragmentadas. Em geral, os municípios apresentaram uniformidade na distribuição das classes, na escala da paisagem avaliada, sendo o município de Harmonia aquele com a distribuição mais uniforme, e o município de Vale Real aquele com maior diversidade, na distribuição dos tipos de uso de solo avaliados, conforme indicado pelo Índice de Uniformidade de Shannon.

O detalhamento, em nível das classes, realiza-se por meio das métricas apresentadas na Tabela 7. Exceto pelo município de Montenegro, os municípios avaliados apresentam um padrão comum, quanto às classes de uso e cobertura do solo, no recorte estudado: é predominante, em termos de área, a classe de Vegetação Arbustiva. Todavia, as classes de Área Urbana/Pavimento são as que apresentam maior número de manchas, indicando a existência de um padrão espacial menor e mais fragmentado. No município de Montenegro, predominam, em área, as classes de Área Urbana/Pavimento, enquanto as classes de Vegetação Rasteira/Solo Exposto apresentam a maior quantidade de manchas, no recorte de estudo. No que se refere à maior densidade de manchas, esse aspecto é predominante na Área Urbana e Pavimentada do município de Vale Real. Como uma medida simples de dominância, o Índice de Maior Mancha indica que, nos municípios de Feliz, de Montenegro e de Vale Real, o maior fragmento da paisagem está associado à classe de Área Urbana/Pavimento, ocupando, respectivamente, 11,9%, 33,1% e 10,9% dos recortes em análise. Por outro lado, nos municípios de Maratá, de Alto Feliz e de Vale Real, a maior mancha observada é pertencente à classe de Vegetação Arbustiva, correspondendo a, respectivamente, 19,9%, 19,2% e 46,4% dos recortes em análise.

Tabela 7 – Métricas de paisagem, em nível das classes de uso e cobertura do solo.

Município	Métrica de Manchas	Vegetação Arbustiva	Vegetação Rasteira / Solo Exposto	Área Urbana / Pavimento	Água
FELIZ	Número (un.)	4.683	7.834	8.962	617
	Densidade (un./ha)	572,2	957,3	1.095,1	75,4
	Índice de Maior Mancha (%)	7,4	2,1	11,8	0,99
MARATÁ	Número (un.)	8.650	13.188	25.347	-
	Densidade (un./ha)	547,3	834,5	1.603,9	-
	Índice de Maior Mancha (%)	19,9	2,2	2,3	-
MONTENEGRO	Número (un.)	9.799	16.319	12.164	502
	Densidade (un./ha)	713,4	1.188,0	885,5	36,6
	Índice de Maior Mancha (%)	5,8	3,9	33,1	0,15
ALTO FELIZ	Número (un.)	3.713	7.658	14.106	6.67
	Densidade (un./ha)	420,6	867,6	1.598,0	75,6
	Índice de Maior Mancha (%)	19,2	1,7	4,0	0,12
HARMONIA	Número (un.)	2.464	2.972	4.058	-
	Densidade (un./ha)	781,0	942,0	1.286,2	-
	Índice de Maior Mancha (%)	9,7	5,5	10,9	-
VALE REAL	Número (un.)	8.236	11.986	33.850	25.22
	Densidade (un./ha)	424,6	618,0	1.745,2	130,0
	Índice de Maior Mancha (%)	46,4	2,5	3,3	0,27

Fonte: elaborada pela autora, 2022.

A distribuição das áreas das manchas pode ser observada, mais detalhadamente, na análise em nível das manchas. Nesta escala, identifica-se, também, as métricas de borda (Perímetro – PERIM); de forma (Relação Perímetro/Área – PARA; o Índice de Dimensão Fractal –FRAC; e o Índice de Contiguidade – CONTIG); e de agregação (Distância Euclidiana do Vizinho mais Próximo – ENN).

Nessa perspectiva, os resultados obtidos para o recorte do município de Feliz estão ilustrados na Figura 93. Na distribuição das áreas, para cada classe, é possível observar uma variabilidade significativa, no tocante ao tamanho das manchas. Tal aspecto decorre, tanto devido à presença de grandes áreas contínuas, de cerca de 97 ha, quanto a espaços fragmentados, de 4 m² – limite da resolução da imagem utilizada. Os padrões menores, entretanto, foram identificados como predominantes na paisagem. Destaca-se, quanto a essa variabilidade, a classe de Área

Urbana/Pavimento, que apresenta, não apenas a ocorrência predominante de áreas menores, mas, também, a ocorrência da maior mancha contínua. As manchas referentes ao Solo Exposto/Vegetação Rasteira, ainda que mais frequentes em menores fragmentos, são predominantes em relação às demais classes, quando avaliadas as manchas de dimensões intermediárias.

No tocante ao perímetro das manchas, repete-se o mesmo padrão observado para a área. Os menores valores da Relação Perímetro/Área são mais frequentes na classe de Solo Exposto/Vegetação Rasteira; e os valores maiores são mais frequentes nas manchas de Área Urbana. À exceção da classe de Água, a relação de maior frequência observada, em todas as classes, é a de que cada metro quadrado do fragmento presente na paisagem é delimitado por 2 m de borda. Por esse ângulo, as formas, em geral, apresentam baixo grau de complexidade, sendo possível observar a prevalência da ocorrência de valores de Índice de Dimensão Fractal inferiores a 1,3, em todas as classes de uso e cobertura do solo.

Em todas as classes de uso e cobertura do solo, são frequentes os Índices de Contiguidade muito baixos ou próximos a zero. Um padrão de distribuição da continuidade das manchas bastante similar é observado em todas as classes, a exceção das manchas de Área Urbana/Pavimento, nas quais o índice é superior a 0,6, limite a partir do qual as manchas começam a ser menos frequentes. Já, a Distância Euclidiana do Vizinho mais Próximo, mais frequente, é de apenas 8 metros, para todas as classes, exceto para a classe Água.

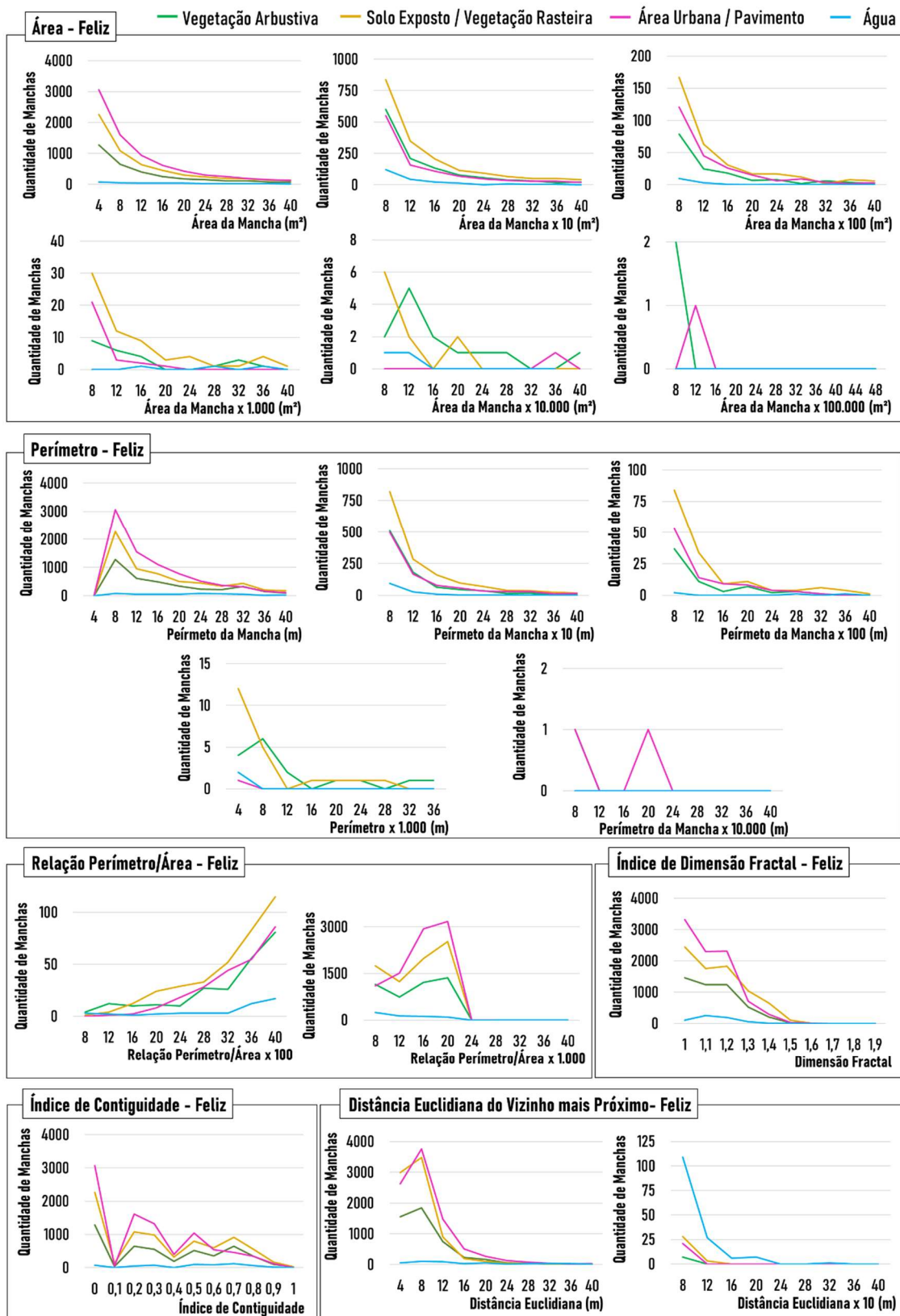


Figura 93: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Feliz.

(Elaborada pela autora, 2022)

Na Figura 94, expõem-se as distribuições das métricas, em nível das manchas, para o recorte de análise do município de Maratá. A área das manchas varia entre 4 m² e 200 ha e a distribuição das áreas das manchas segue o mesmo padrão, quando avaliadas as áreas entre 4 e 4.000 m². Em contrapartida, entre 4.000 m² e 20 ha observa-se uma predominância das manchas da classe de Solo Exposto/Vegetação Rasteira. Entretanto, as maiores manchas, conforme já apontava o Índice de Maior Mancha, são encontradas na classe de Vegetação Arbustiva, fornecendo indícios da presença de um remanescente florestal na área de estudo. Além disso, a distribuição dos perímetros das manchas segue um padrão semelhante ao das áreas.

Ademais, a Relação Perímetro/Área mais frequente é menor nas áreas classificadas como Área Urbana/Pavimento, o que pode indicar uma menor complexidade da forma urbana, estabelecida em lotes e em ruas mais regulares, quando comparadas às áreas de Solo Exposto/Vegetação Rasteira e de Vegetação Arbustiva. O Índice de Dimensão Fractal corrobora com essa análise, uma vez que os maiores valores de FRAC são menos frequentes na classe de Área Urbana/Pavimentação. De maneira geral, o índice não ultrapassa 1,6, sendo mais frequentes os valores entre 1 e 1,3, indicativos de formas mais regulares, na composição da paisagem.

A continuidade das manchas segue um padrão de distribuição semelhante, nas classes de Vegetação Arbustiva e Solo Exposto/Vegetação Rasteira, nas quais a presença de manchas de dimensão mínima, considerando a resolução da imagem em análise, é predominante. Na Área Urbana/Pavimentação, observa-se uma maior continuidade das manchas. Ainda que o índice de continuidade das manchas indique certa fragmentação da paisagem, é possível verificar que as manchas de mesma classe estão relativamente próximas: majoritariamente, a distância entre as manchas de mesma classe estão entre 4 e 24 metros, sendo a distância máxima observada de 120 metros.

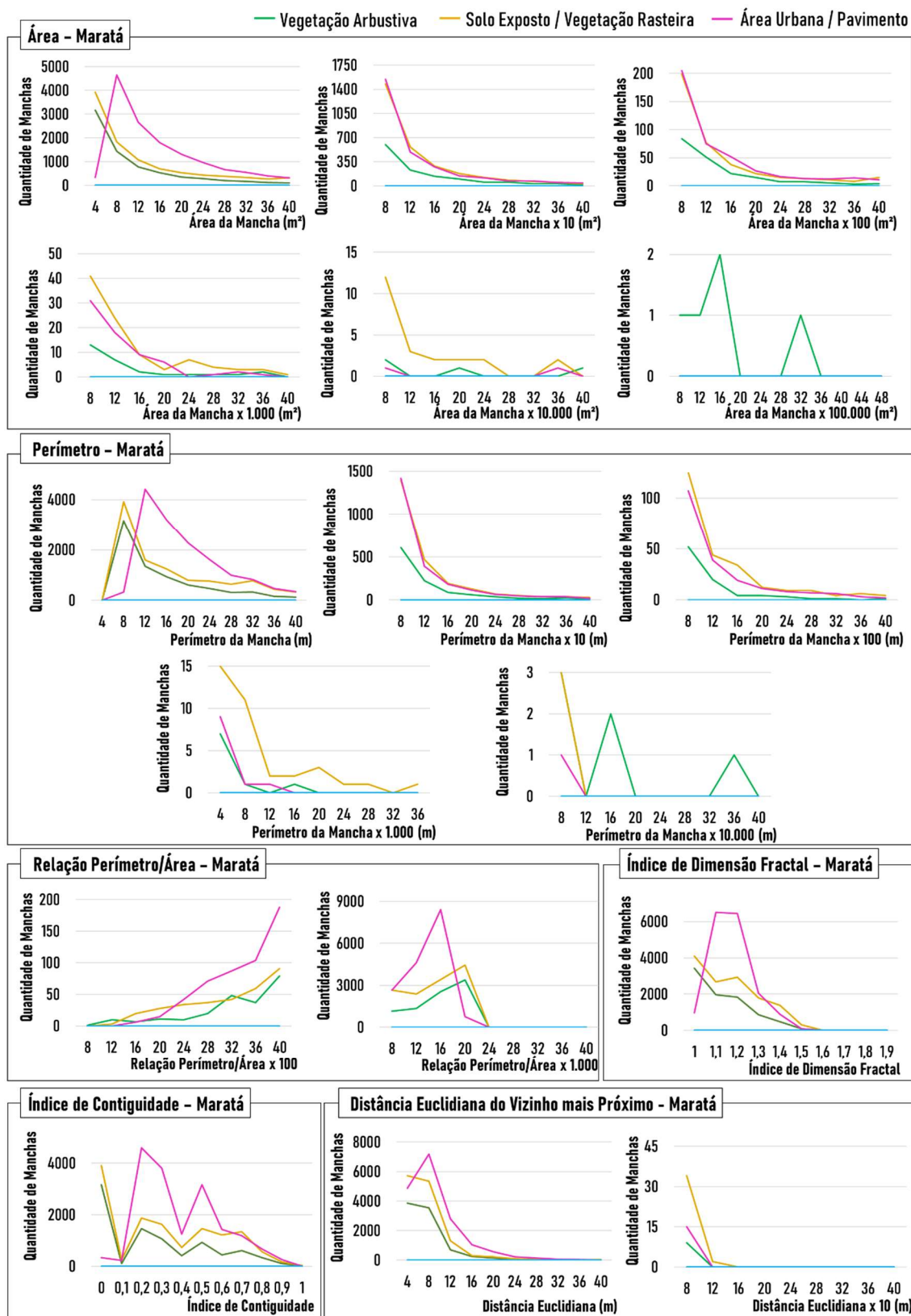


Figura 94: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Maratá. (Elaborada pela autora, 2022)

No que se refere aos resultados obtidos para o recorte do município de Montenegro, esses são exibidos na Figura 95. As manchas são configuradas por áreas entre 4 m² e 480 ha, e por um perímetro entre 8 m e 940 km. Tanto em área, quanto em perímetro, os menores padrões ocorrem com mais frequência nas classes de Solo Exposto/Vegetação Rasteira e Área Urbana/Pavimento. Nas dimensões intermediárias (entre 80 m² e 8 ha de área, e 80 m e 12 km, de perímetro), ganham destaque as áreas de Vegetação Arbustiva, que passam a ser mais frequentes do que as classes de maior antropização. A mancha de maior área no município cobre uma área de cerca de 94 ha e corresponde à classe de Área Urbana/Pavimento. Por apresentar o maior índice de urbanização da região, o município apresenta expressiva continuidade da mancha urbana, ainda que também seja possível perceber duas grandes manchas contínuas da classe de Vegetação Arbustiva, que podem atuar como habitat conservado, integrado à ocupação urbana, possibilitando a sobrevivência de espécies mais sensíveis aos efeitos de borda, e que necessitam de maior espaço.

A Relação Perímetro/Área mais frequente, para todas as classes de uso e cobertura do solo, neste município, é de 1,6 a 2,0 metros de borda, delimitando cada metro quadrado da mancha. Ainda que possa indicar um grau de irregularidade na forma das manchas, esse resultado pode ser interpretado, em ambientes majoritariamente urbanos, como um indício de uma maior fronteira entre as classes de uso e cobertura do solo, o que pode favorecer a diversidade e as trocas ocorridas na cidade, dadas as suas diferentes funções na composição da paisagem.

Em relação à continuidade das manchas, é possível identificar a presença, tanto de áreas fragmentadas, quanto de maiores áreas contínuas, para todas as classes de uso e cobertura do solo. A classe de Vegetação Arbustiva manifesta maior frequência de manchas com maior contiguidade, enquanto as áreas classificadas como Área Urbana/Pavimento têm manchas com menor conectividade espacial. Os fragmentos de uma mesma classe, em sua maioria, distam entre si entre 4 e 80 m, exceto para a classe de Água, na qual as manchas chegam a distar 542 m entre si. Dessa forma, os resultados indicam um alto nível de conectividade entre manchas de mesma classe.

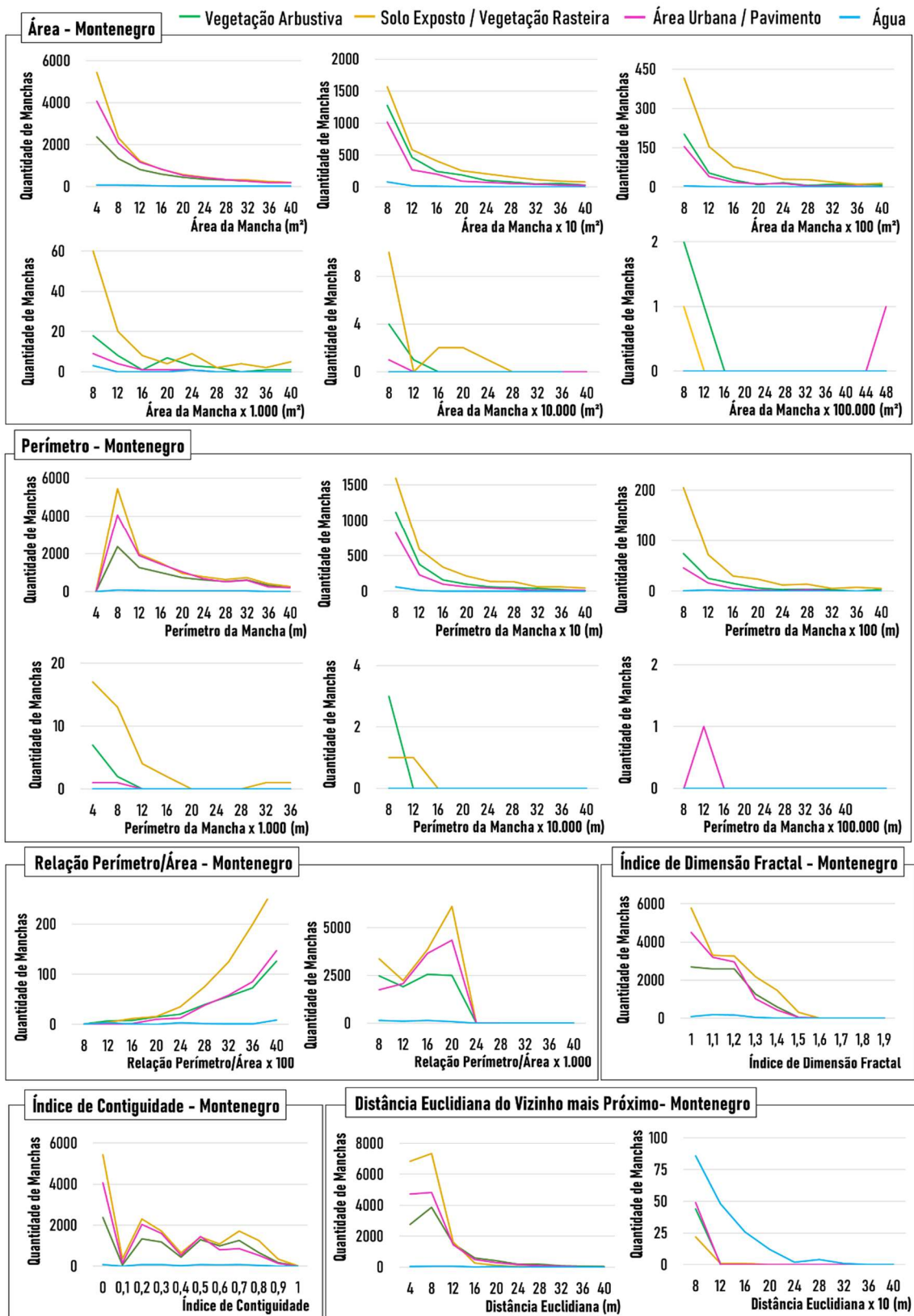


Figura 95: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Montenegro. (Elaborada pela autora, 2022)

Os resultados obtidos para o recorte do município de Alto Feliz podem ser observados na Figura 96, em que se pode perceber que a distribuição do tamanho das manchas segue um padrão semelhante, para todas as classes, quando avaliadas as manchas com área entre 4 e 400 m². Já, as manchas de tamanho intermediário, entre 800 m² e 16 ha, são predominantemente associadas à classe de Solo Exposto/Vegetação Rasteira. As maiores manchas, com áreas entre 80 e 240 ha, são pertencentes à classe de Vegetação Arbustiva. Sendo assim, a distribuição do perímetro das manchas segue um padrão semelhante.

No tocante à Relação Perímetro/Área mais frequente, essa taxa ocorre entre 1,2 e 2 metros de borda, delineando cada metro quadrado de área. Quanto ao Índice de Dimensão Fractal, é possível observar a predominância de formas de menor complexidade, mais próximas às da geometria euclidiana, indicando a existência de uma ocupação urbana em loteamentos de forma regular, bem como de terras agrícolas, em que o cultivo também ocorre em espaços regulares. A classe de maior irregularidade, mais próxima às formas naturais, são as de Vegetação Arbustiva e, em destaque, a de Água.

Em relação à conectividade espacial das manchas, verifica-se o mesmo padrão de distribuição de frequência, para todas as classes. Ainda que sejam predominantes as manchas unitárias, a existência de manchas com diferentes graus de conectividade é perceptível. Em termos de conectividade entre as manchas, observa-se que, majoritariamente, as manchas de mesma classe distam, entre si, de 4 a 24 metros. Na classe de Água, é possível destacar uma menor conectividade entre as manchas, que chegam a distar 200 m. Em vista disso, os resultados indicam um maior isolamento entre as áreas cobertas por corpos d'água, enquanto as áreas de Vegetação Arbustiva, Solo Exposto/Vegetação Rasteira e Área Urbana/Pavimento apresentam maior conectividade.

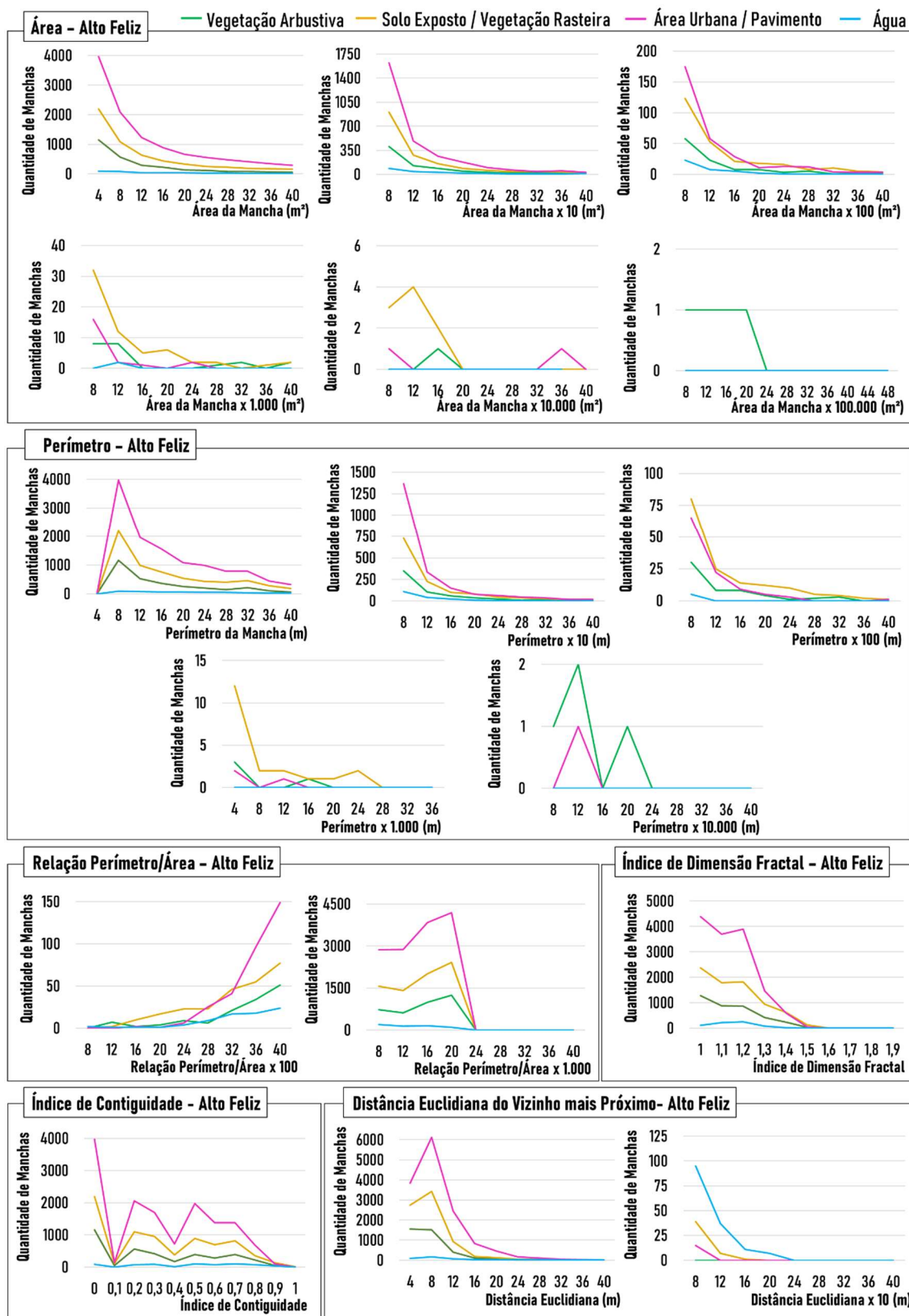


Figura 96: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Alto Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

Na sequência, a Figura 97 ilustra os resultados obtidos para o recorte do município de Harmonia. Tanto as manchas de menor área (entre 4 e 40 m²), quanto a mancha mais extensa (com cerca de 360 ha), pertencem à classe de Área Urbana/Pavimento. A distribuição das frequências das diversas faixas de perímetros segue um padrão semelhante. A relação entre o perímetro e a área da mancha mais frequente, em todas as classes, é a de 2 m/m². O Índice de Dimensão Fractal, cuja maior frequência ocorre entre 1 e 1,2, aponta para a existência de formas regulares. A classe de Solo Exposto/Vegetação Rasteira tem, por sua vez, índice ligeiramente superior, indicativo de formas mais complexas. Tais manchas ocorrem, principalmente, em meio à área urbanizada, em loteamentos ainda não construídos, e em espaços vazios entre as construções.

Além disso, as manchas da classe de Área Urbana/Pavimento apresentam menores índices de conectividade interna. Já, nas classes de Solo Exposto/Vegetação Rasteira e Vegetação Arbustiva, manchas de maior conectividade são observáveis, com maior frequência. Nesse contexto, as maiores distâncias entre manchas de mesma classe são de cerca de 80 metros, indicando conectividade entre elas. As distâncias mais frequentes ocorrem entre 4 e 8 metros.

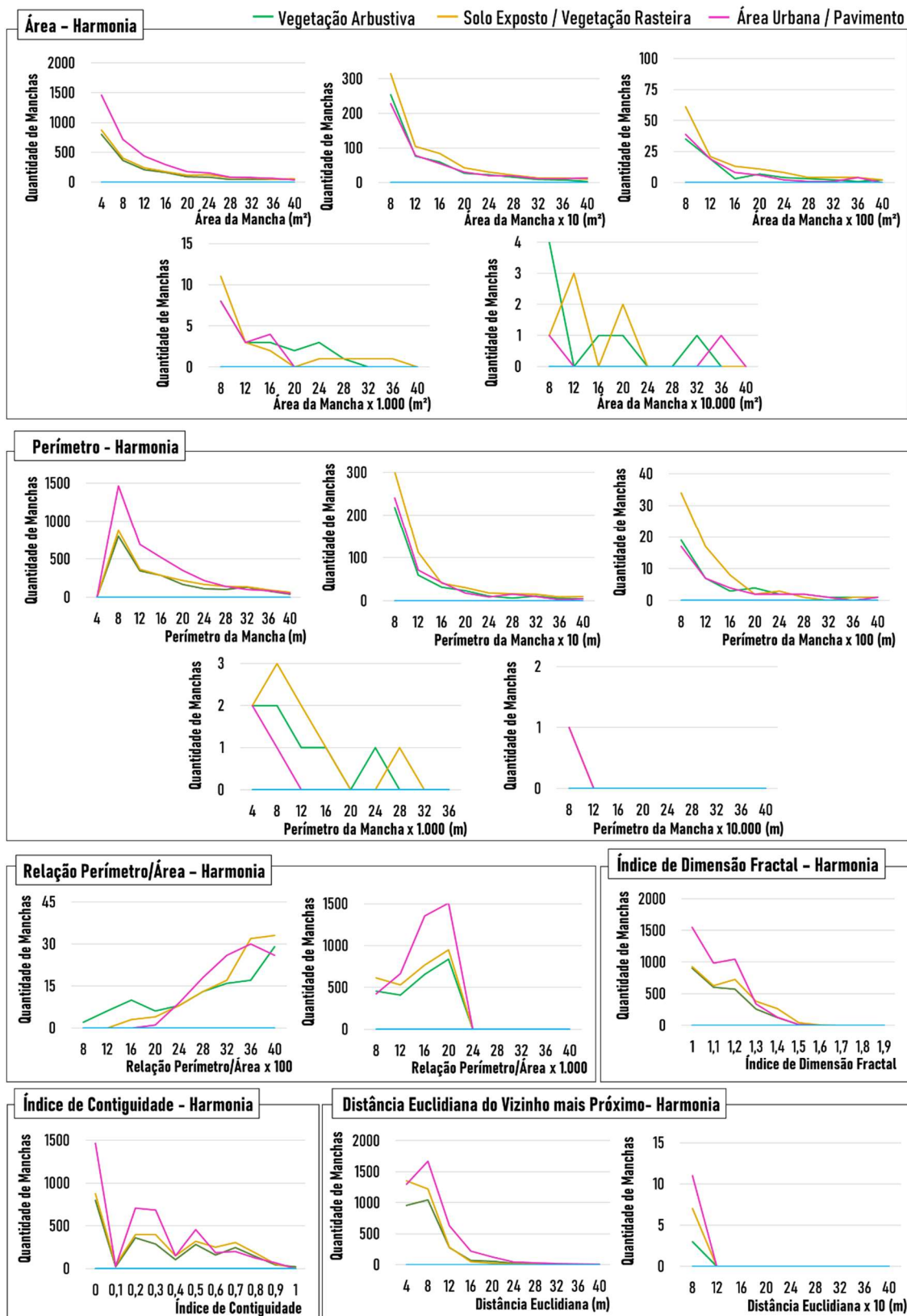


Figura 97: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Harmonia.

(Elaborada pela autora, 2022)

No que se refere aos resultados obtidos para o recorte do município de Vale Real, esses são exibidos na Figura 98. Nesse cenário, as manchas, de áreas reduzidas, de Área Urbana/Pavimento são as mais frequentes. No entanto, destaca-se a presença de uma grande mancha contínua, de 64 ha, identificada na área urbana principal do município, situada na porção sul do CDP. Quando avaliadas as áreas intermediárias, entre 80 m² e 4 ha a classe de maior frequência passa a ser a de Solo Exposto/Vegetação Rasteira. Contudo, a maior área contínua observada corresponde à classe de Vegetação Arbustiva, com cerca de 901 ha.

A ocupação do território conta, além do núcleo principal, com núcleos dispersos de área urbana, na porção norte e oeste do recorte de estudo. Em consequência, quando avaliada globalmente, a paisagem incorpora parte significativa de áreas de vegetação preservada. As maiores manchas, em termos de área, apresentam características particulares, quanto à sua origem e função: a maior mancha de Vegetação Arbustiva ostenta a menor relação Perímetro/Área da paisagem avaliada, sendo de apenas 605,2 m de borda, para cada hectare da área da mancha; já, na maior mancha da classe de Área Urbana/Pavimento, 2.229,5 m de borda envolvem, em média, cada hectare de mancha. Tais resultados indicam que as áreas preservadas de Vegetação Arbustiva podem representar um habitat importante, principalmente para algumas espécies. No tocante à principal mancha urbana, essa apresenta grande conectividade com as demais classes de uso e cobertura do solo.

Dessa maneira, devido à presença de muitas manchas de menor área, na classe de Área Urbana/Pavimento, essa é a que apresenta menores Índices de Contiguidade. Não obstante, a conectividade entre as manchas de mesma classe é a maior, para a mesma classe. Distâncias superiores a 80 metros, entre manchas da mesma classe, são mais frequentes nas classes de: Água, em função da distância natural entre os corpos de água; e de Solo Exposto/Vegetação Rasteira, devido à existência de áreas agrícolas, em diferentes estágios de desenvolvimento, espalhadas pela área de estudo.

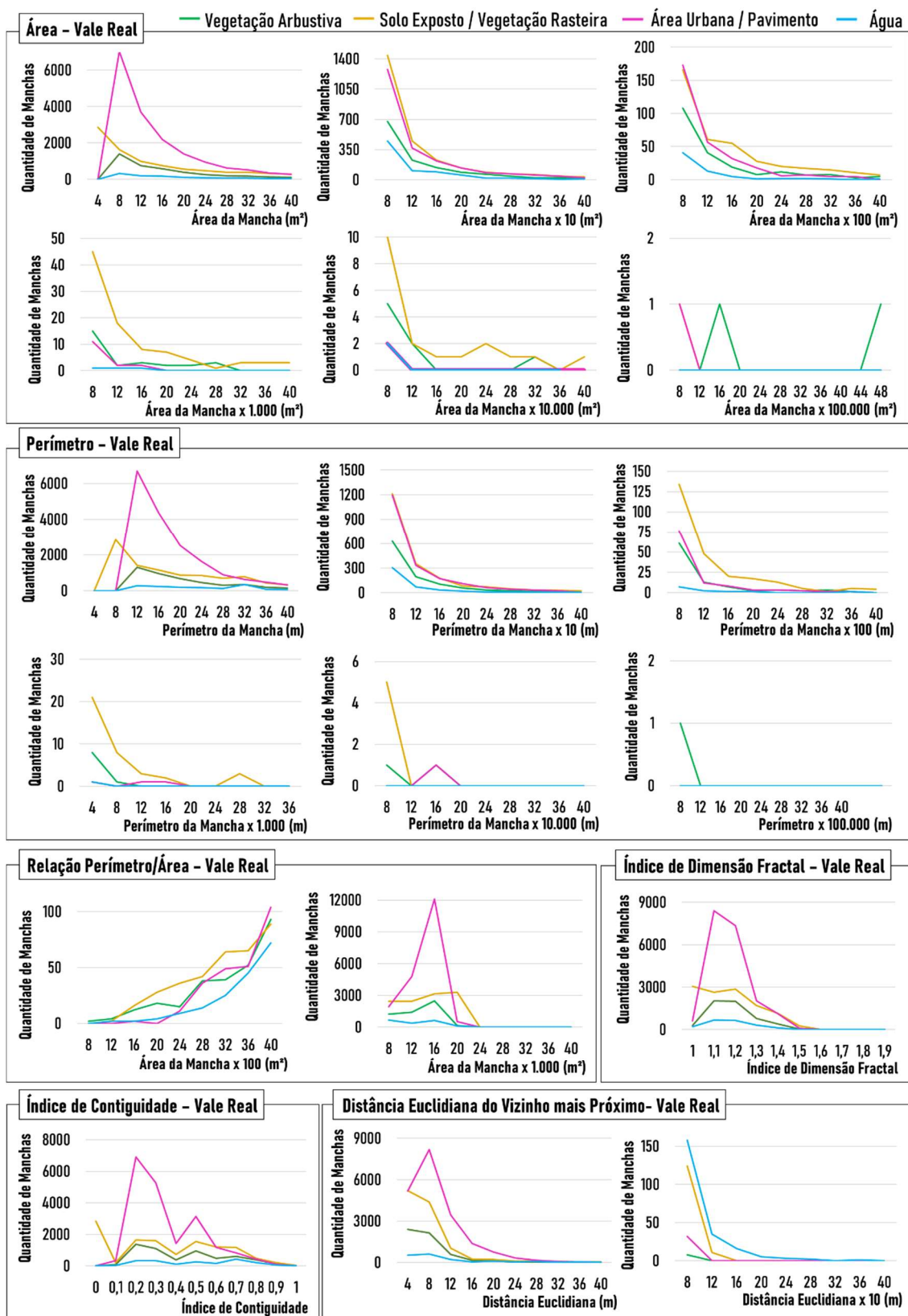


Figura 98: Distribuição das métricas de paisagem, por classe, em nível das manchas, no município de Vale Real.

(Elaborada pela autora, 2022)

A avaliação das métricas, em si, constitui uma fonte de informação valiosa sobre os padrões espaciais de uso e cobertura do território. Desta forma, sua aplicação, realizada tradicionalmente em avaliações da ecologia da paisagem, pode ser extrapolada, como uma ferramenta para a orientação de diversos aspectos do ordenamento territorial urbano. Alguns princípios utilizados na avaliação de ambientes naturais podem ser igualmente válidos para a análise de espaços urbanos. Entretanto, a interpretação das métricas deve levar em consideração as particularidades específicas aos ambientes naturais e construídos. Logo, a consideração do que pode ser transposto entre elementos de diferentes funções, e do que precisa ser adaptado, pode auxiliar na consolidação da integridade da paisagem, enquanto um sistema composto por elementos de diferentes naturezas.

Na presente análise, foi possível identificar os fragmentos por classe, de acordo com sua área e seu perímetro. Nesse viés, essa avaliação pode ser útil, a título de exemplo, para a avaliação dos espaços verdes existentes na área urbana, e de suas principais características.

O **perímetro** de uma mancha pode, também, ser entendido como a fronteira entre diferentes classes de uso do solo. Desse modo, sua extensão e sua distribuição são indicadores importantes do padrão da paisagem.

A **forma** das manchas, expressa pela relação entre perímetro e área e pelo Índice de Dimensão Fractal, pode ser compreendida como medida de sua complexidade. Via de regra, a redução da complexidade de forma indica a predominância de formatos regulares, característicos de espaços com interferência humana, seja no ambiente construído, ou em áreas agrícolas.

Valores reduzidos obtidos para essas métricas podem indicar a interferência antropogênicas no espaço e precisam de atenção, especialmente, quando identificadas em classes, tais como a de Vegetação Arbustiva. Nas classes de maior antropização, menores distâncias entre fragmentos podem sugerir uma boa conectividade urbana. Nas áreas de vegetação arbustiva, a proximidade entre os fragmentos facilita a locomoção da fauna silvestre.

Portanto, algumas relações entre as métricas das paisagens e as características de cada classe de uso e cobertura do solo puderam ser evidenciadas. Todavia, diante da diversidade de formas e de classes, algumas dessas relações podem não estar claramente identificáveis ao analista. À vista disso, entende-se que a utilização de ferramentas de análise multivariada poderá auxiliar na identificação e no entendimento dessas relações, tema que será abordado na seção 5.3.3.

5.3.3 Análise Multiescalar: do Regional ao Intraurbano

A utilização de dados de sensoriamento remoto para o reconhecimento de padrões no ambiente urbano pode possibilitar às cidades, mesmo para aquelas com menores recursos, diagnosticar suas vulnerabilidades, aumentando sua capacidade de adaptação. Apesar do potencial que o uso de dados de sensoriamento remoto oferece, identificou-se que, de modo geral, tal potencial tem sido pouco explorado no planejamento urbano. É inegável que, uma vez analisados por meio de ferramentas adequadas e com o devido aprofundamento, os dados e informações, quando existentes, permitiriam um planejamento bem mais sustentável do território.

Entende-se, pois, que à medida que uma maior quantidade de dados seja disponibilizada às comunidades, dados esses com abrangência espacial e temporal, e que permitam o seu processamento por novas tecnologias, as quais se caracterizam por sua elevada capacidade de processamento de informações, haverá uma tendência a um maior compartilhamento e disseminação do conhecimento sobre os processos territoriais. Os resultados, uma vez corretamente analisados, poderão ser aplicados, tanto na definição de diretrizes específicas para o planejamento urbano, quanto na identificação de elementos que contribuam para a implantação de paisagens urbanas mais eficientes. Deve-se ter presente, contudo, que os modelos de relações lineares podem não permitir a identificação das complexidades presentes nas relações entre as diversas escalas de análise que constituem o ambiente urbano. Nesse sentido, o uso de ferramentas baseadas em modelos geoestatísticos e de análises associadas às técnicas de *machine learning* e *data mining* poderão auxiliar na identificação de padrões mais complexos.

Nesse contexto, nesta seção serão exploradas as relações entre: as variáveis temperatura superficial e índice de sequestro de carbono, considerando-se a escala regional (cf. seção 5.3.1); e a constituição da paisagem e suas métricas, considerando a abordagem na escala intraurbana (cf. seção 5.3.2).

Em suma: verificou-se a ocorrência de gradientes das variáveis trabalhadas na escala regional, nos anéis de densidade populacional dos municípios do Vale da Felicidade; e avaliou-se a influência da composição do uso e ocupação do solo e das métricas das áreas verdes, nas variáveis temperatura superficial e índice de sequestro de carbono, nos municípios referidos na seção 5.3.2 (Alto Feliz, Harmonia, Feliz, Maratá, Montenegro e Vale Real).

5.3.3.1 Detalhamento da metodologia

Os estudos relativos a análises intraurbanas e regionais requerem a consideração de aspectos associados a características específicas a cada escala de avaliação. Na Figura 99, por exemplo, observa-se as diferenças entre as informações fornecidas pelos satélites Landsat-5, utilizadas para análises na escala regional, e pelo CBERS 4A, utilizado em análises intraurbanas. Para o estabelecimento de relações entre as variáveis associadas à escala regional (temperatura de superfície e índice de sequestro de carbono) e as variáveis associadas à escala local (uso e ocupação do solo e métricas da paisagem), requer-se compatibilização das informações sendo relacionadas.

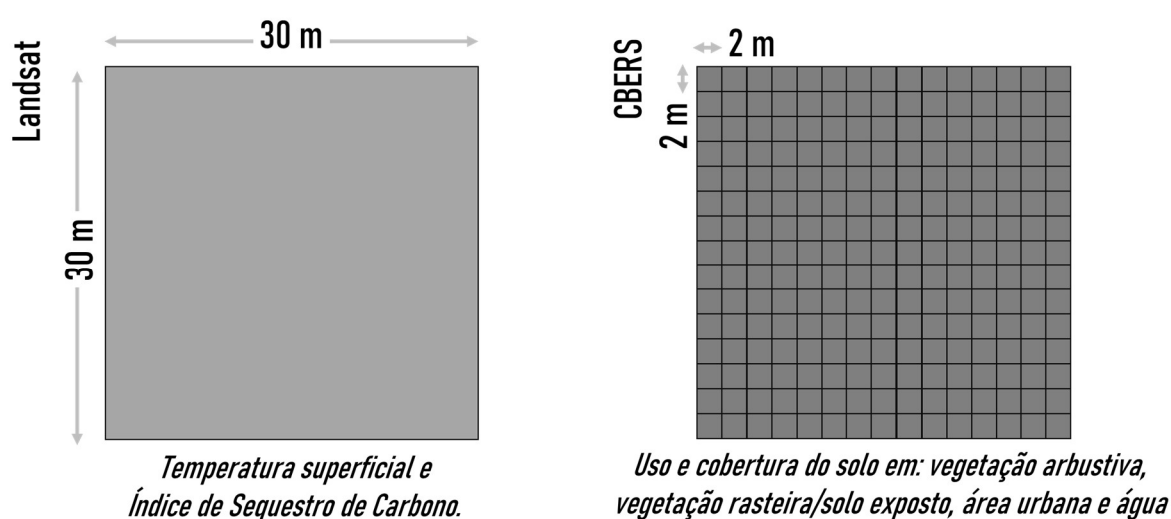


Figura 99: Relação entre as informações em escala regional e em escala local.

(Elaborada pela autora, 2022)

Por exemplo, a cada informação sobre **temperatura superficial e índice de sequestro de carbono pela vegetação** (obtidas por meio do satélite Landsat) estão associadas informações sobre o **uso e cobertura do solo**, em 225 pontos (obtidas por meio do satélite CBERS 4A). Cada um desses pontos pode ser categorizado, em relação à variável uso e ocupação do solo, como: vegetação arbustiva; vegetação rasteira/solo exposto; área urbana; ou água.

Com base em tais informações, buscou-se, inicialmente, verificar a ocorrência de gradientes das variáveis de NDVI (índice de vegetação), de NDBI (índice de área construída), capacidade

de absorção de CO₂ e temperatura superficial, considerando os anéis de densidade populacional, delimitados conforme metodologia apresentada na seção 5.1.2. Para tal, foi calculada a média de cada variável, no período mais atual (cf. seção 5.3.1.1.1), em cada um dos três anéis.

O detalhamento dos resultados obtidos para o **município de Feliz** foi realizado por meio do traçado de transectos, partindo do ponto central, em direção ao limite do anel externo. Em seguida, foi avaliado como a composição do uso e cobertura do solo, nas quatro classes referidas, poderiam explicar as variáveis de temperatura superficial e do índice de sequestro de carbono. Calculou-se, também, as temperaturas superficiais médias, máximas, mínimas, bem como a amplitude das temperaturas, para cada classe de uso do solo. Para a avaliação da capacidade de absorção de CO₂ pela paisagem, além do cálculo de suas médias, para cada classe de uso do solo, caracterizou-se a sua variação ao longo de um transecto no município de Feliz. Desse modo, procurou-se identificar a ocorrência e distribuição de sumidouros de carbono, característicos da vegetação intraurbana.

A fim de verificar como a ocorrência de cada tipo de **uso e cobertura do solo** possam estar associadas a variações **de temperatura superficial e de capacidade de sequestro de carbono**, realizou-se uma análise exploratória. Cabe mencionar que nos modelos de previsão das temperaturas superficiais foi considerada, também como variável determinante de seus valores, a altitude. Foram avaliadas todas as combinações possíveis das variáveis, na busca por um modelo linear, que atendesse aos seguintes critérios estatísticos: valor mínimo de R², de 0,5; e nível de confiabilidade de 95%. Quanto à estimativa das temperaturas superficiais, avaliou-se 29 possíveis modelos de regressão linear, expressando a gama de combinações das variáveis envolvidas. Já, em relação à estimativa do índice do fluxo de carbono, analisou-se um total de 14 modelos de regressão linear possíveis.

Por fim, a identificação de padrões complexos, não claramente explicáveis pelos modelos de regressão linear, foi realizada por meio de duas análises: a primeira delas, foi realizada com base na criação de duas redes neurais artificiais (RNA), no sentido de ajustar funções complexas para a previsão da temperatura superficial e da capacidade de absorção de CO₂ pela paisagem, com base no uso e ocupação do solo; a segunda, baseou-se na classificação, dessa mesma série de dados, pelo método de clusterização *k-means*.

Ambas as RNAs foram caracterizadas pela mesma arquitetura, sendo constituídas por redes, de duas camadas, do tipo *feed-forward*. Os parâmetros que definiram tal arquitetura são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Arquitetura das Redes Neurais Artificiais.

Critérios	Quantitativos definidos	
	Temperatura Superficial	Sequestro de Carbono
Número de entradas	5	4
Número de neurônios da camada oculta	20	
Número de neurônios da camada de saída	1	
Função de Ativação da camada oculta	Sigmoide: $\varphi(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$	
Função de Ativação de saída	Linear: $\varphi(x) = x$	
Algoritmo da RNA	<i>Levenberg-Marquardt</i> (HAGAN; MENHAJ, 1994)	
Critério de parada	Número de <i>epochs</i> e Erro Quadrático Médio	
Medida de erro	Erro Quadrático Médio (EQM) e Correlação (R)	

Fonte: elaborada pela autora, 2022.

Tanto a série de dados utilizada para a previsão de temperaturas superficiais, quanto aquela associada à identificação da capacidade de absorção de dióxido de carbono, foram constituídas por 76.791 amostras. Tais amostras foram aleatoriamente divididas em três grupos, que foram destinados ao **treinamento**, à **validação** e ao **teste** do modelo. Para o **treinamento** do modelo, foram utilizadas 70% das amostras, sendo a rede ajustada de acordo com o erro encontrado. Para a **validação** da generalização resultante da RNA, foram utilizadas 15% das amostras. As amostras restantes (15%) foram utilizadas para o **teste da rede**, possibilitando uma medida independente da performance do modelo, durante e após o treinamento. Todas as três etapas foram realizadas com o auxílio do software Matlab R2012b.

Já, para a identificação dos clusters naturais de conjunto de dados, foi empregado o método *k-means*. Considerando um determinado número de grupos, o algoritmo busca a solução na qual: os atributos de cada grupo apresentem a maior **similaridade**; e os atributos entre os grupos distintos apresentem a maior **dissimilaridade** (cf. seção 3.2.1).

Para a definição da quantidade de grupos mais adequada²¹, utilizou-se a estatística *pseudo-F*, proposta por Caliński e Harabasz (1974), e calculada conforme a Equação 42:

$$pseudo - F = \frac{R^2}{n_c - 1} \bigg/ \frac{1 - R^2}{n - n_c} \quad \text{Equação 42}$$

em que n_c é o número de grupos; n é o número de elementos do conjunto de dados; e R^2 é expresso pela Equação 43:

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} \quad \text{Equação 43}$$

em que *SST* expressa as diferenças entre os grupos (Equação 44); e *SSE* expressa as similaridades dos dados no mesmo grupo (Equação 45).

$$SST = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_v} (V_{ij}^k - \bar{V}^k)^2 \quad \text{Equação 44}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_v} (V_{ij}^k - \bar{V}_t^k)^2 \quad \text{Equação 45}$$

em que: n_i , é o número de elementos do grupo i ; n_v , é o número de variáveis usados no grupo; V_{ij}^k , é o valor da variável k , do elemento j , no grupo i ; \bar{V}^k , é o valor médio da variável k ; e \bar{V}_t^k , é o valor médio da variável k , no grupo i .

Por fim, realizou-se o agrupamento das áreas verdes, de acordo com as métricas de: área; perímetro; distância do vizinho mais próximo; continuidade; e dimensão fractal. Todas as áreas classificadas como vegetação arbustiva foram agrupadas pelo método *k-means*, totalizando 5 grupos, com as características particulares das 5 métricas consideradas. Avaliou-se a influência dos diferentes padrões da vegetação no ambiente construído, por meio do cálculo da média de

²¹ A quantidade de grupos considerada mais adequada é aquela na qual a semelhança, entre os dados de um mesmo grupo, e as diferenças, entre dados de grupos distintos, são mais evidentes.

temperatura de superfície e do índice de CO_{2flux} na paisagem, em cada grupo, e para cada município, bem como a média, mediana, limites superiores e inferiores, 1º e 3º quartis globais.

É importante destacar que, nessa última análise, também foi necessária a compatibilização entre as escalas das variáveis regionais e locais, devido à existência de áreas verdes de dimensões reduzidas. Nesse sentido, aplicou-se o interpolador da Krigagem (OLIVER e WEBSTER, 1990) aos dados espaciais de temperatura de superfície e CO_{2flux}, sendo selecionado, para tanto, o método ordinário e o modelo de semivariograma empírico esférico.

O resumo estatístico dos agrupamentos apresenta seis valores: mínimo; quartil inferior; mediana; quartil superior; valor máximo; e *outliers*. São considerados *outliers* superiores os valores superiores ao limite calculado pela Equação 46. Já os *outliers* inferiores são os valores inferiores ao limite calculado pela Equação 47.

$$outlier_{superior} = Q_3 + 1,5 * IQR \quad \text{Equação 46}$$

$$outlier_{inferior} = Q_1 - 1,5 * IQR \quad \text{Equação 47}$$

em que: Q_1 , é o quartil inferior, ou primeiro quartil; Q_3 , é o quartil superior, ou terceiro quartil; e IQR , é a distância interquartil.

O sumário estatístico é apresentado por meio de diagramas de caixa, cujo modelo é ilustrado na Figura 100.



Figura 100: Sumário estatístico de cada grupo.
(Elaborada pela autora, 2022)

Os cálculos e a espacialização dos resultados foram realizados no software ArcGIS 10.5.1.

5.3.3.2 Identificação de gradientes

Na Figura 101, apresentam-se os gradientes das variáveis CO_{2flux} , NDVI, NDBI, e temperatura superficial. Observam-se gradientes bem definidos, para todas as variáveis, nos municípios de: Alto Feliz, Bom Princípio, Feliz, Harmonia, Linha Nova, Maratá, São José do Hortêncio, São Pedro da Serra, São Vendelino e Tupandi. Nesses municípios, a capacidade de sequestro de carbono e o índice de vegetação são reduzidos gradativamente, com a proximidade ao ponto central do CDP do município; já, as variáveis de índice de área construída e temperatura, por sua vez, aumentam com a proximidade ao centro.

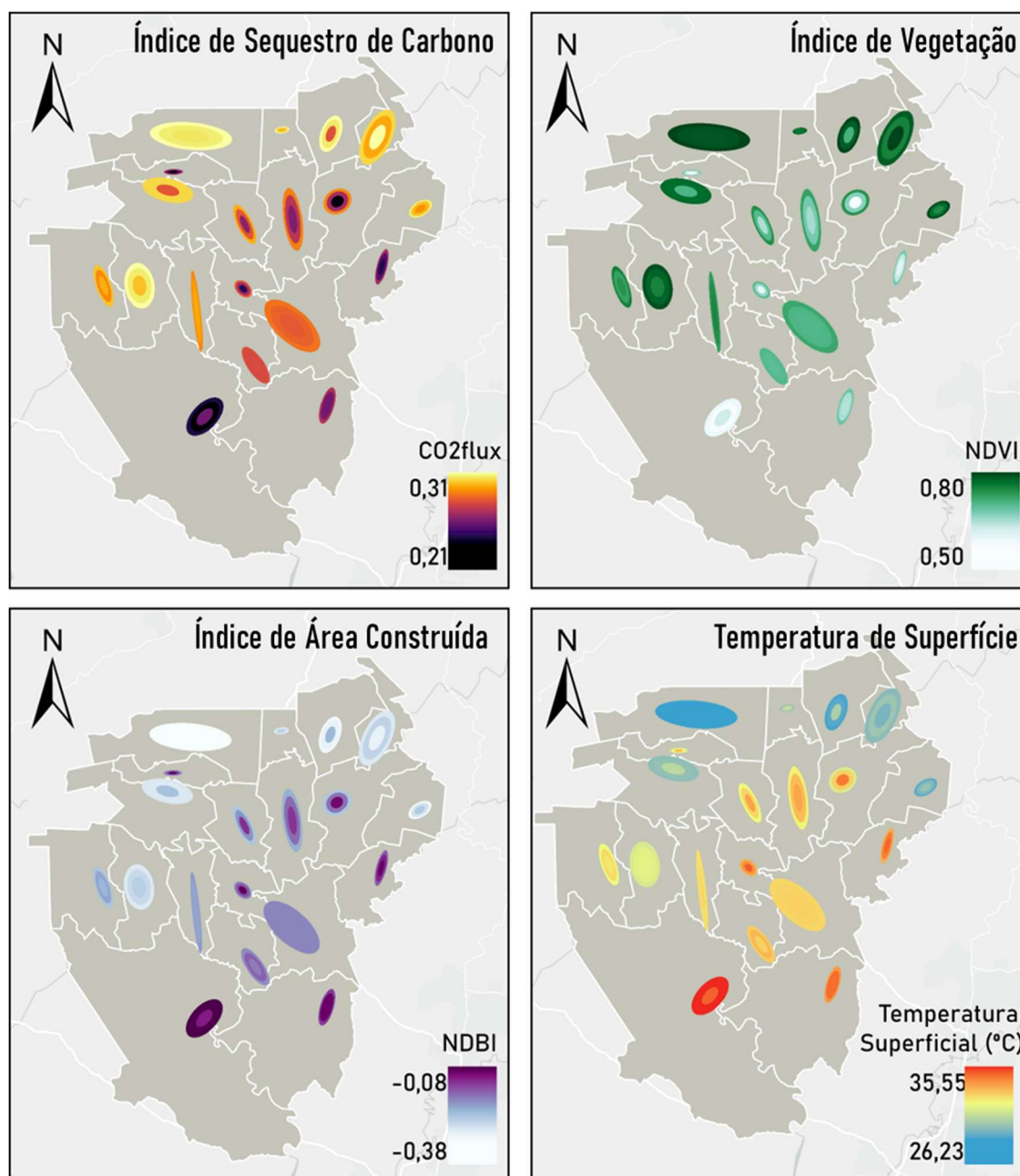


Figura 101: Gradientes de CO₂flux, NDVI, NDBI e temperatura superficial, nos CDPs dos municípios do Vale da Felicidade (RS).
(Elaborada pela autora, 2022)

Merece destaque o fato de que, no município de Feliz, é possível observar os gradientes mais bem definidos da região, em consonância com as propriedades de vivacidade dos sistemas vivos, detalhadas na seção 3.1.2, relacionadas a: limites bem definidos; centros bem definidos, e que se fortalecem gradualmente; e coerência entre padrões internos. Os gradientes são ilustrados, por meio de transectos, na Figura 102.

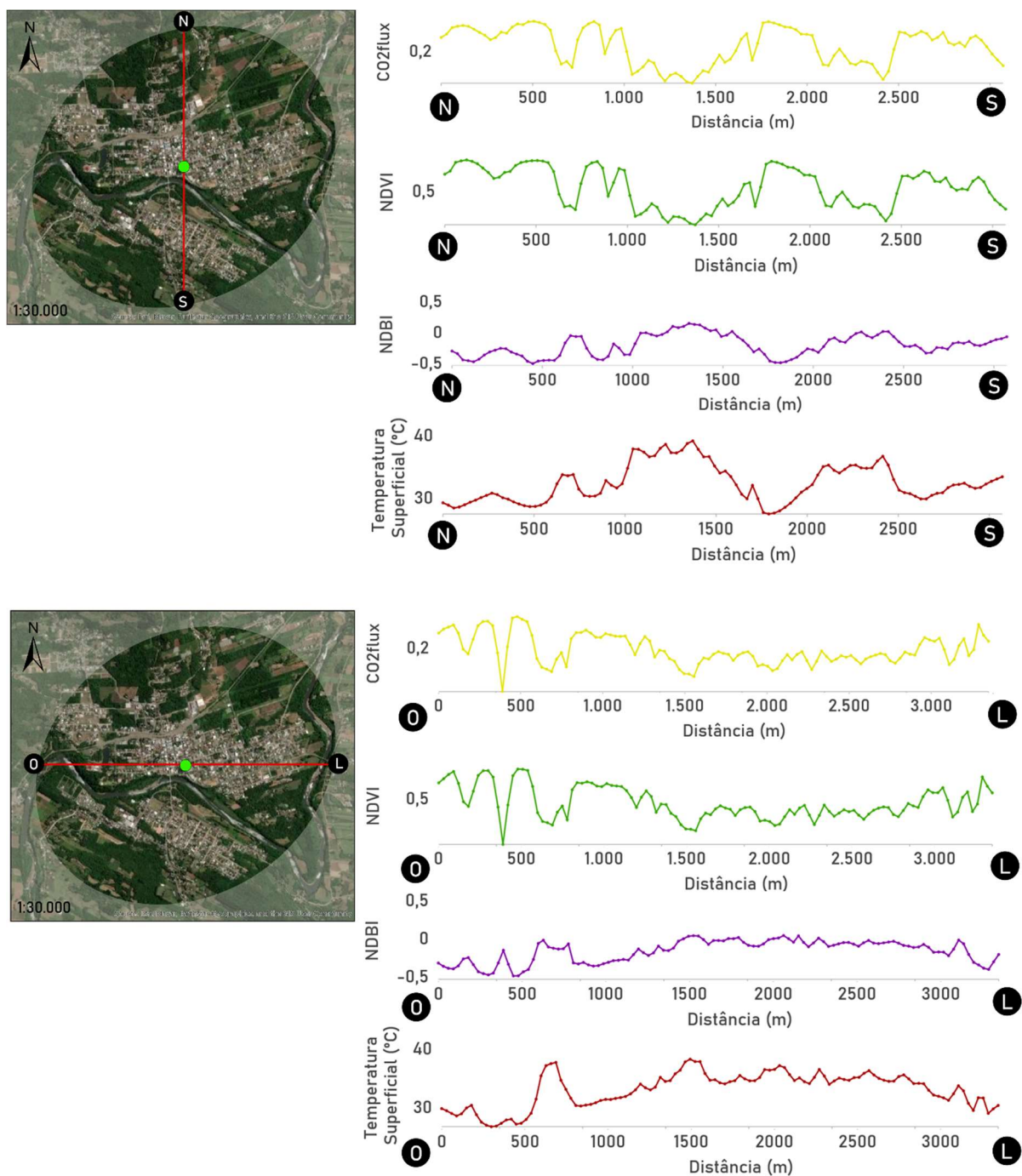


Figura 102: Perfil das variáveis de CO_{2flux} , NDVI, NDBI e temperatura superficial, nos transectos Norte-Sul e Oeste-Leste, na área urbana central do município de Feliz. (Elaborada pela autora, 2022)

5.3.3.3 Análise da temperatura superficial e do sequestro de carbono pela vegetação, nas diferentes classes de uso do solo

Na Figura 103, apresentam-se os valores médios, máximos e mínimos da temperatura de superfície, bem como a amplitude e o desvio padrão das temperaturas observadas, nas diferentes classes de uso e ocupação do solo. Tal análise é realizada, tanto com base no banco de dados completo – constituído pelas informações obtidas nos CDPs dos municípios de Feliz, Maratá, Montenegro, Alto Feliz, Harmonia e Vale Real – quanto por município.

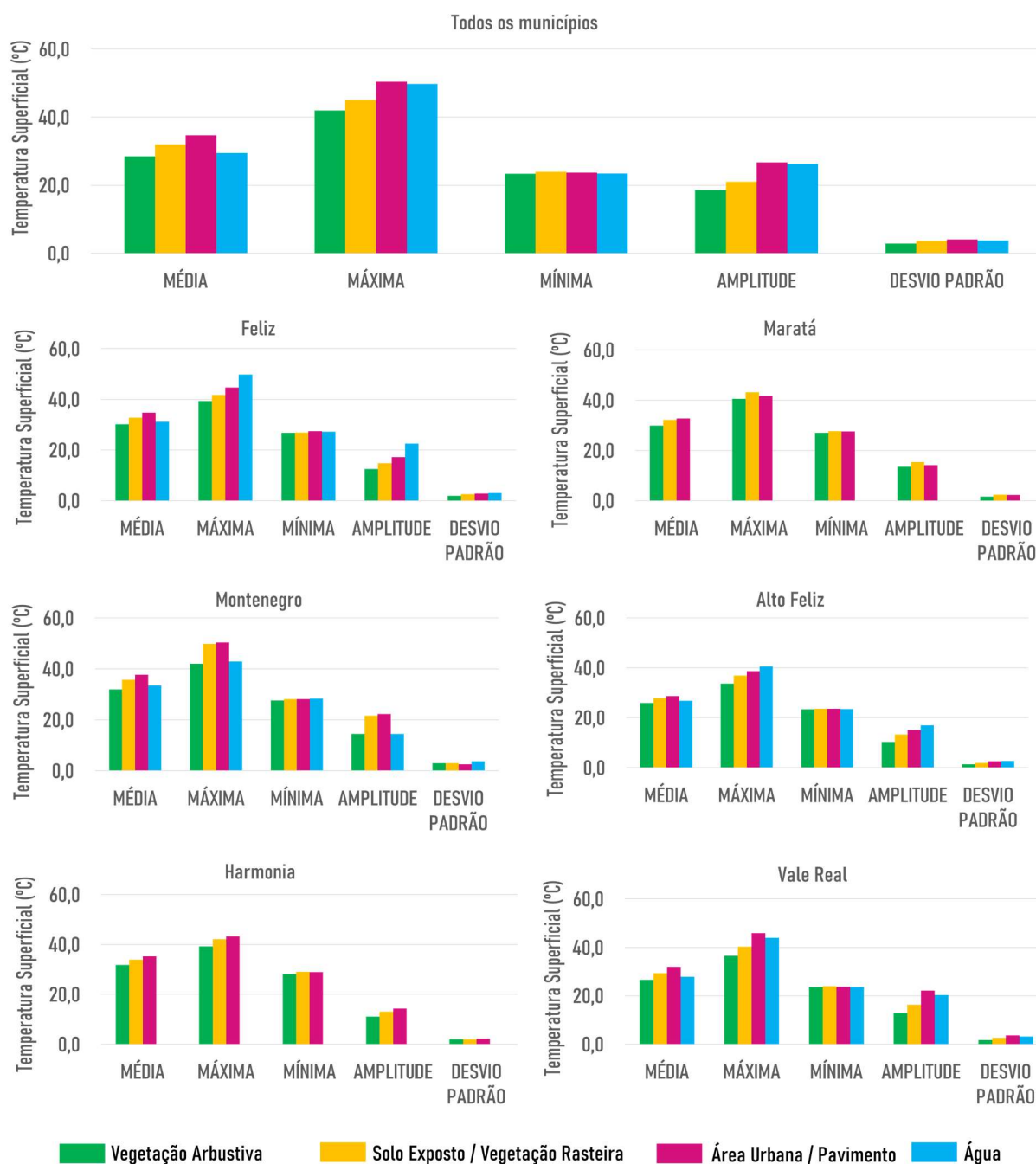


Figura 103: Temperaturas de superfície, por classe de uso e cobertura do solo.

(Elaborada pela autora, 2022)

A média das temperaturas superficiais é maior nas áreas urbanizadas, atingindo 34,6°C, seguidas das áreas de vegetação rasteira e solo exposto, nas quais se observa a temperatura média de 32,0°C. As menores temperaturas de superfície são observadas na classe de vegetação arbustiva (28,5°C), seguidas das áreas cobertas por corpos hídricos (29,5 °C).

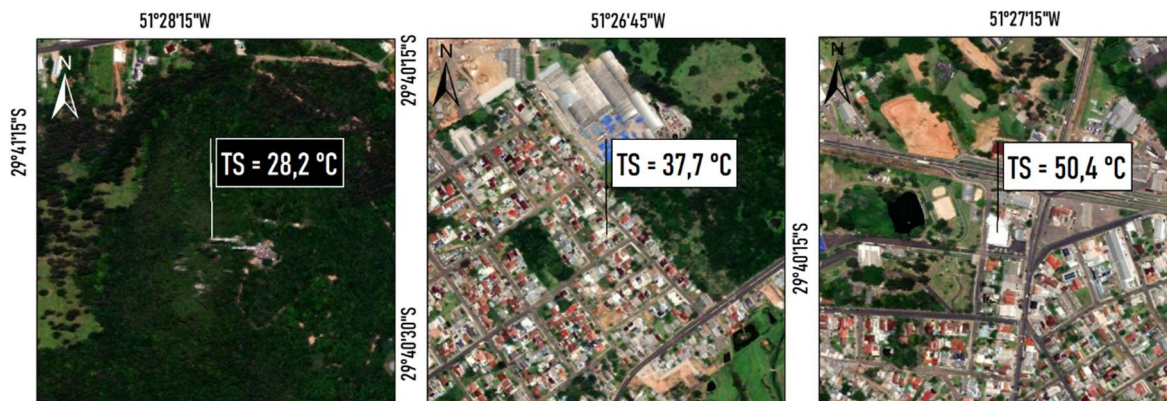
As temperaturas máximas atingiram os maiores valores nas áreas urbanizadas, onde foi possível observar temperaturas de até 50,4°C. Nas áreas cobertas por corpos hídricos, a maior temperatura observada atingiu 49,8°C, ainda que, na média, tenham sido observadas temperaturas mais amenas. Observou-se, também, a ocorrência de temperaturas máximas mais amenas nas áreas de vegetação arbustiva (de 42°C); e nas áreas de vegetação rasteira/solo exposto (de 45°C).

Observou-se, contudo, que a temperatura de superfície mínima apresenta baixa variação entre as classes de uso do solo. Identificou-se uma diferença de apenas 0,6°C, entre as classes de vegetação arbustiva e água (usos com os menores valores) e a classe de vegetação rasteira/solo exposto (uso com maior temperatura mínima). Logo, a amplitude térmica observada, em cada classe de uso e cobertura do solo, é determinada, de maneira mais expressiva, pelas temperaturas máximas atingidas em cada classe.

Alguns padrões podem ser destacados, como o observado nas áreas de vegetação arbustiva, que apresentam as menores temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, amplitude térmica e o menor desvio padrão. O resultado observado, então, reforça o papel crítico dessas áreas, não apenas na redução das temperaturas, mas, também, no controle das condições climáticas locais. As características de albedo e umidade, determinadas pela presença de vegetação arbustiva, têm influência direta na amplitude térmica.

Destaca-se, em oposição, o padrão observado nas áreas urbanizadas, que, além das maiores temperaturas médias, apresentaram também as maiores variações entre temperaturas mínima e máxima observadas. Tal resultado evidencia, não apenas da influência do ambiente construído no aumento das temperaturas, mas, também, como os diferentes materiais associados à paisagem urbana podem influenciar a variação das temperaturas observadas. Já, as áreas de solo exposto e vegetação rasteira, ainda que não proporcionem uma redução de temperatura tão significativa quanto a observada nas áreas de vegetação arbustiva, podem constituir importantes espaços intraurbanos, com potencial para redução e controle das temperaturas urbanas.

Na Figura 104, apresentam-se alguns exemplos de locais, no município de Montenegro, associados a áreas construídas, que, por suas diferentes composições, atingiram as temperaturas mínima, média e máxima, observadas para a classe, no município.



Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Figura 104: Exemplos de áreas construídas que atingiram as temperaturas mínima, média e máxima.
(Elaborada pela autora, 2022)

A capacidade de absorção de CO₂ na paisagem, estimada pelo índice CO₂flux, apresentou diferenças significativas entre as classes de uso e cobertura do solo, conforme gráfico apresentado na Figura 105. Observou-se, nas áreas de vegetação arbustiva, que o sequestro de carbono da atmosfera era: 27% superior ao das áreas de solo exposto/vegetação rasteira; 56% superior ao das áreas urbanizadas; e 39% superior ao das áreas cobertas por corpos hídricos.

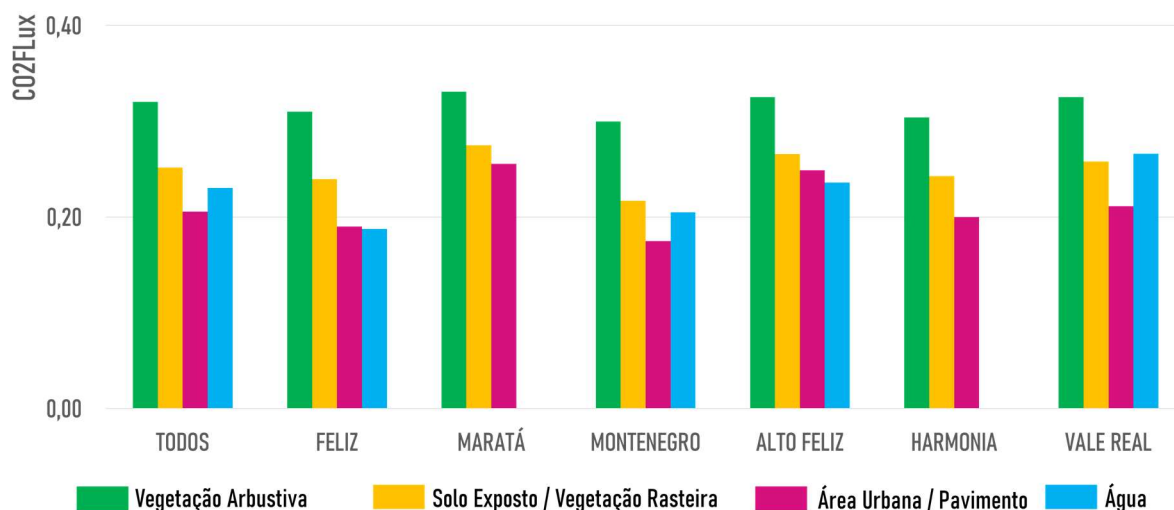


Figura 105: CO₂flux médio, por classe de uso e cobertura do solo.
(Elaborada pela autora, 2022)

Nas áreas vegetação arbustiva, a atividade fotossintética foi mais expressiva, apresentando uma variação do índice CO₂flux de 0,10 a 0,44, com média de 0,32. Já, nas áreas classificadas como

solo exposto/vegetação rasteira, a média do índice foi de 0,25, variando entre 0 (em áreas de solo exposto) e 0,40 (em áreas de cobertura vegetal rasteira).

Foi possível associar as variações de intensidade fotossintética com as classes de uso e ocupação do solo. Tal associação corrobora com o que foi identificado por Amaral et al. (2021), que afirma que a atividade fotossintética mais expressiva das áreas vegetadas, quando comparadas às áreas urbanas, resulta na ocorrência de sumidouros de carbono. Evidenciam-se, desta forma, áreas mais ou menos aptas no desempenho de funções de suporte.

Na Figura 106, apresenta-se o perfil do sequestro de carbono, no centro urbano do município de Feliz. Embora a produção de carbono esteja associada aos usos presentes nas áreas urbanas, tanto as áreas de vegetação arbustiva presentes na periferia, quanto no interior do tecido urbano, apresentam alto potencial para o sequestro de CO₂ da atmosfera. Destaca-se, especificamente, a vegetação marginal ao rio Caí, que, além das evidentes funções na proteção do corpo d'água, também apresenta a função de sumidouro de carbono, entre os núcleos de área construída.

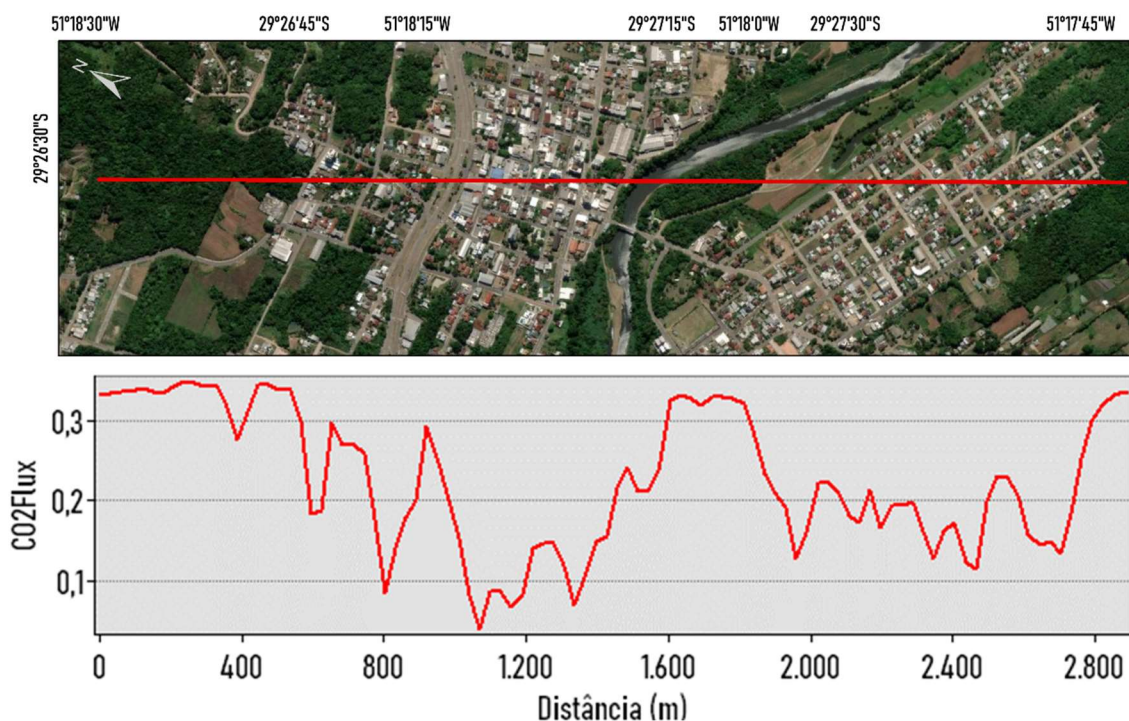


Figura 106: Perfil do potencial de sequestro de carbono no município de Feliz/RS.

(Elaborada pela autora, 2022)

Conforme demonstrado, a presença de fragmentos da vegetação pode ser associada com importante função na manutenção bioclimática, seja como redutora das temperaturas superficiais, seja devido a sua capacidade de subtrair dióxido de carbono da atmosfera. Nesse sentido, na próxima seção será realizada uma análise exploratória da influência das diversas formas de uso e cobertura do solo nas variáveis ambientais analisadas.

5.3.3.4 Análise exploratória

Em relação à estimativa da temperatura de superfície, o critério de R^2 mínimo foi atendido por 69% dos modelos avaliados, enquanto o critério de máximo valor p de significância foi atingido por todos os modelos avaliados. Quanto aos modelos de estimativa do índice do fluxo de carbono, o critério de R^2 mínimo foi atendido por 79% dos modelos avaliados. O máximo valor p de significância foi alcançado, também, por todos os modelos.

Quanto à avaliação da temperatura superficial, todas as variáveis analisadas foram consideradas estatisticamente significativas, nos 29 modelos avaliados. A porcentagem de vegetação arbustiva e a altitude apresentaram contribuição, no sentido de redução de temperaturas, em todos os modelos. A contribuição da porcentagem de área urbana, por sua vez, contribuiu no sentido de elevação de temperaturas de superfície. Destaca-se uma particularidade associada às variáveis de porcentagem de vegetação rasteira e solo exposto, e de água: a depender da combinação com as demais variáveis do modelo, sua contribuição pode ser, tanto no sentido de elevação, quanto no de redução das temperaturas. A porcentagem de vegetação rasteira e solo exposto apresentou relação predominantemente positiva (no sentido de elevação de temperaturas) (71,4% dos modelos). Já, a presença da classe de água apresentou relação predominantemente negativa (85,7% dos modelos).

Quanto ao índice de sequestro de carbono, todas as variáveis foram consideradas estatisticamente significativas, nos 14 modelos avaliados. Conforme as expectativas, em todos os modelos a presença de vegetação arbustiva contribuiu de maneira positiva e a de áreas urbanizadas foi uma contribuinte negativa. Embora a porcentagem, tanto de vegetação rasteira e solo exposto, quanto de água, tenham relação negativa, na maioria dos modelos, foram observados, também, alguns modelos nos quais tais variáveis apresentaram contribuições positivas, a depender de sua combinação com as demais variáveis. Enquanto a primeira classe teve 71,4% dos modelos com contribuição negativa, a segunda o teve em 57,1% dos modelos.

Quando avaliadas isoladamente, as variáveis que apresentaram maior coeficiente R^2 , em relação à temperatura superficial, foram as porcentagens de vegetação arbustiva ($R^2=0,49$); de área urbana ($R^2=0,52$); e de altitude ($R^2=0,44$). Já em relação ao CO_2flux , os maiores coeficiente R^2 estão associados às variáveis de porcentagens de vegetação arbustiva ($R^2=0,61$) e de área urbana ($R^2=0,59$). As relações entre tais variáveis e a temperatura superficial são ilustradas na Figura 107.

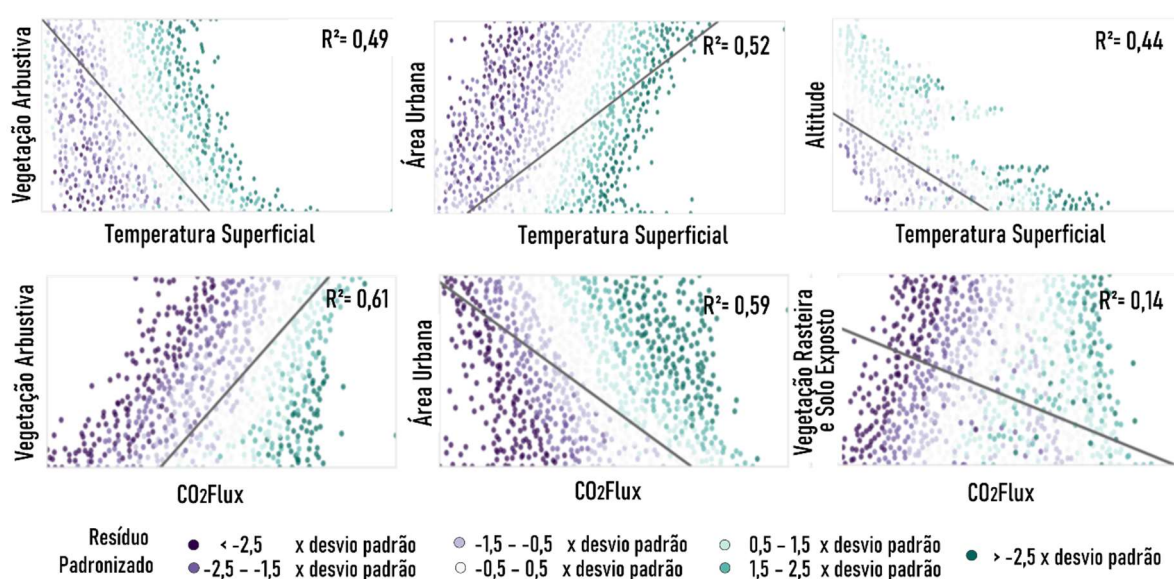


Figura 107: Relações entre a proporção de vegetação arbustiva, proporção de área urbana e altitude, com a temperatura superficial e o índice de sequestro de carbono.
(Elaborada pela autora, 2022)

Duas métricas foram consideradas para a seleção do modelos de análise do presente estudo: a) a ocorrência do maior coeficiente R^2 , que indica o viés explanatório das variáveis; e b) a proporção das classes com maior ocorrência na área. O modelo explanatório da temperatura de superfície, resultante desses aspectos, é expresso na Equação 48, cujo coeficiente R^2 foi de 0,78. O coeficiente de sequestro de carbono é expresso na Equação 49, cujo coeficiente R^2 foi de 0,73:

$$TS = -0,36 VA_{\%} + 2,67 VRSE_{\%} + 8,21 AU_{\%} - 0,0114 ALT + 29,97 \quad \text{Equação 48}$$

em que $VA_{\%}$ é a porcentagem de vegetação arbustiva; $VRSE_{\%}$ é a porcentagem de vegetação rasteira e solo exposto; $AU_{\%}$ é a porcentagem de área urbana; e ALT é a altitude, em metros.

$$CO_{2flux} = 0,12 VA_{\%} + 0,03 VRSE_{\%} - 0,1 AU_{\%} + 0,23 \quad \text{Equação 49}$$

Ainda que seja possível evidenciar as relações entre a composição do uso e cobertura do solo, com as temperaturas superficiais e o índice de sequestro de carbono, é importante destacar que os modelos lineares analisados apresentam limitações, quanto à sua capacidade de predição dos valores. Na Figura 108, são apresentados os diagramas de dispersão dos resíduos padronizados, em relação ao valor estimado de temperatura superficial e de CO_{2flux} .

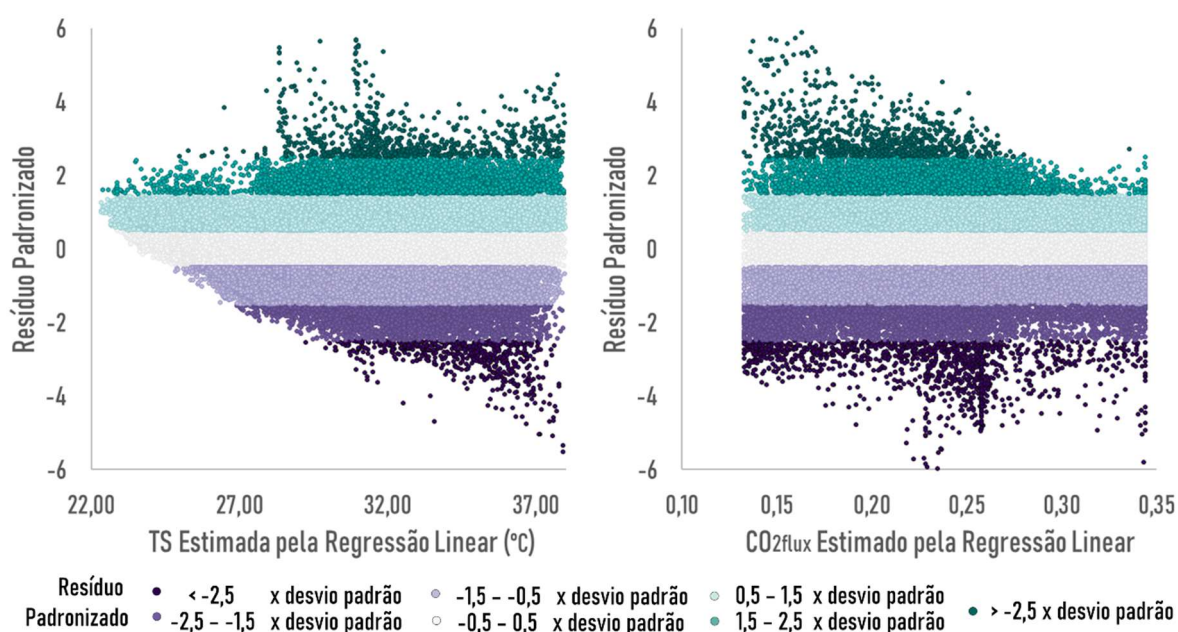


Figura 108: Resíduos padronizados vs. estimativa da temperatura superficial e do índice CO_{2flux} , com base na estimativa realizada por meio das regressões lineares.
(Elaborada pela autora, 2022)

Desta forma, apesar de o modelo de regressão linear ser vital para a compreensão da influência que a composição do uso e ocupação do solo exercem sobre variáveis importantes (temperatura de superfície e capacidade de sequestro de carbono), ele pouco contribui para o entendimento da complexidade inerente a tais relações. Nesse sentido, serão analisadas as potencialidades do uso de ferramentas baseadas em técnicas de inteligência artificial, na identificação de padrões complexos.

5.3.3.5 Identificação de Padrões Complexos

Na Figura 109, é apresentada a estrutura das **redes neurais artificiais (RNAs)**, desenvolvidas para a análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo, e das variáveis de temperatura superficial e de CO_{2flux} .

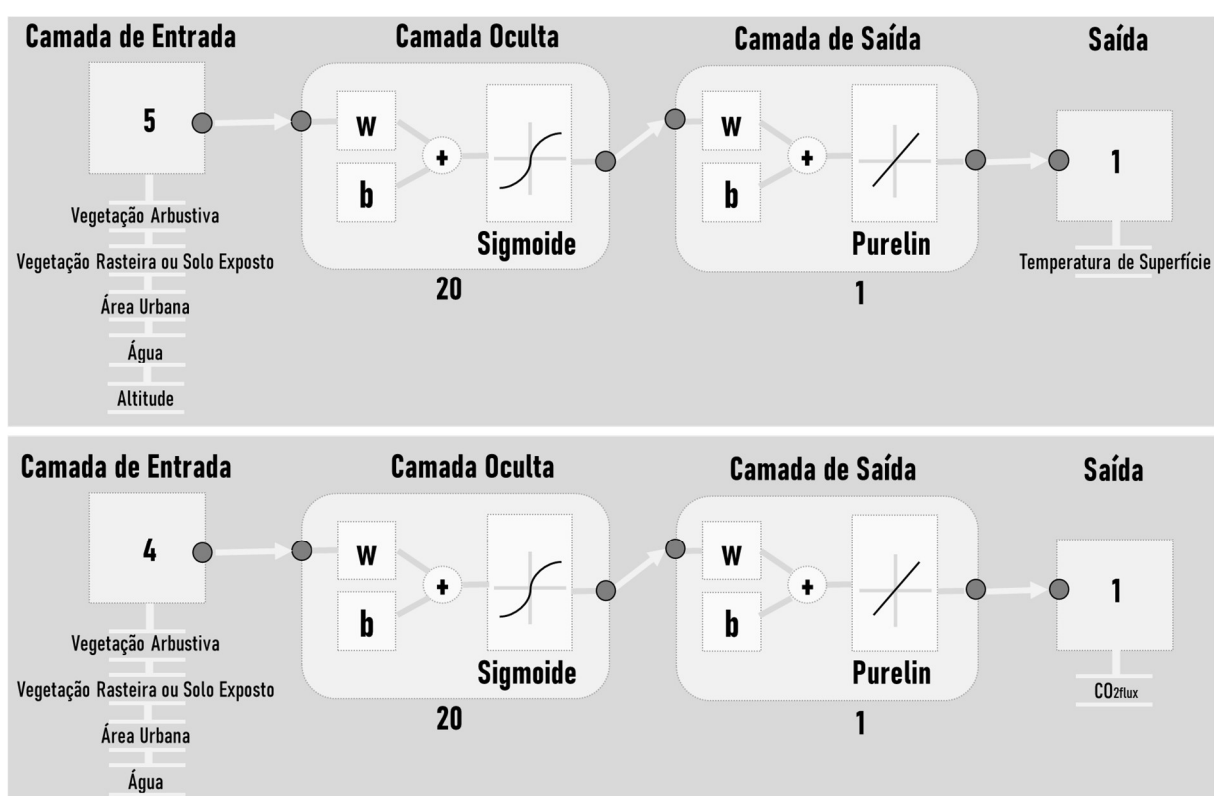


Figura 109. Representação das RNAs, para estimativa das temperaturas superficiais e CO_{2flux} .
(Elaborada pela autora, 2022)

A RNA destinada à avaliação das temperaturas superficiais apresentou coeficiente de correlação R , de 0,91, nas etapas de treinamento, validação e teste. Quanto à RNA destinada à estimativa do índice CO_{2flux} , o coeficiente de correlação R foi superior a 0,86, em todas as etapas. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados das redes obtidas pelo algoritmo *Levenberg-Marquardt*.

Critérios	Quantitativos definidos	
	Temperatura Superficial	Vegetação Rasteira
Época	252	94
Treinamento	Erro Quadrático Médio (MSE)	0,00129
	Correlação de Treinamento	0,86
Validação	Erro Quadrático Médio (MSE)	0,00127
	Correlação de Treinamento	0,87
Teste	Erro Quadrático Médio (MSE)	0,00129
	Correlação de Treinamento	0,86

Fonte: elaborada pela autora, 2022.

Na Figura 109, são apresentados os diagramas de dispersão dos **resíduos padronizados**, em relação ao valor estimado de temperatura superficial e de CO_{2flux}.

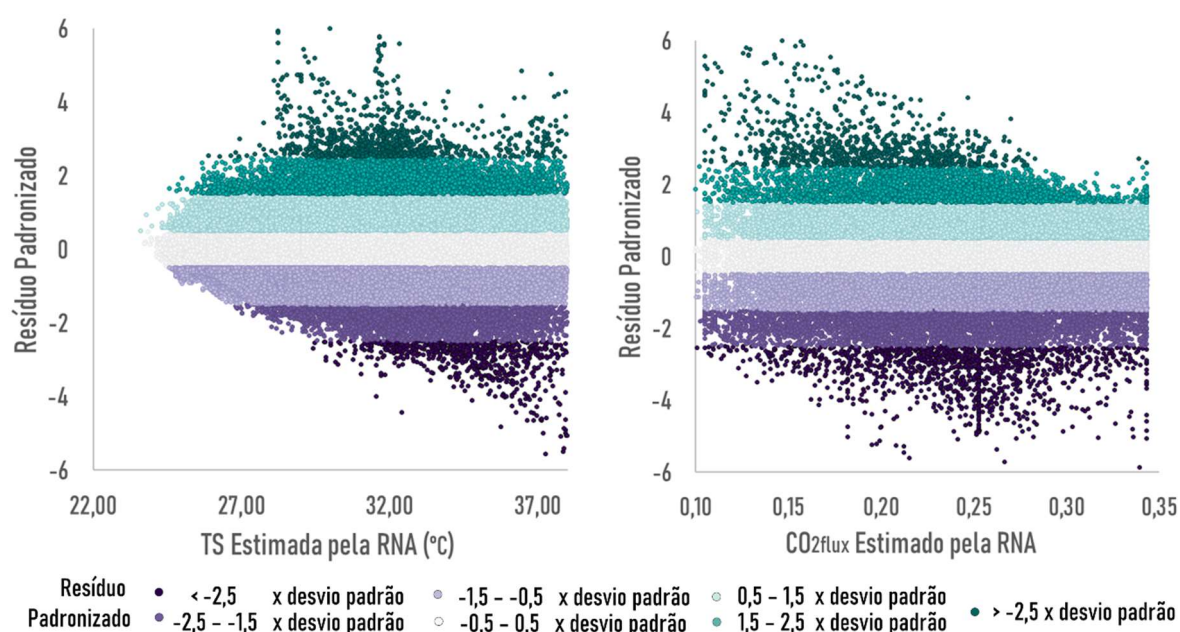


Figura 110: Resíduos padronizados vs. estimativa da temperatura superficial e do índice CO_{2flux}, com base na estimativa realizada por meio das RNAs.

(Elaborada pela autora, 2022)

Na Figura 111, são apresentados os gráficos de dispersão das variáveis de temperatura superficial e do índice CO_{2flux} , comparando os valores observados e estimados. Pode ser observado que as estimativas obtidas por meio das redes neurais artificiais apresentaram melhor performance, quando comparadas às estimativas realizadas por meio das regressões lineares, ao serem avaliados: o coeficiente de determinação R^2 ; o coeficiente de correlação; e o erro médio quadrático.

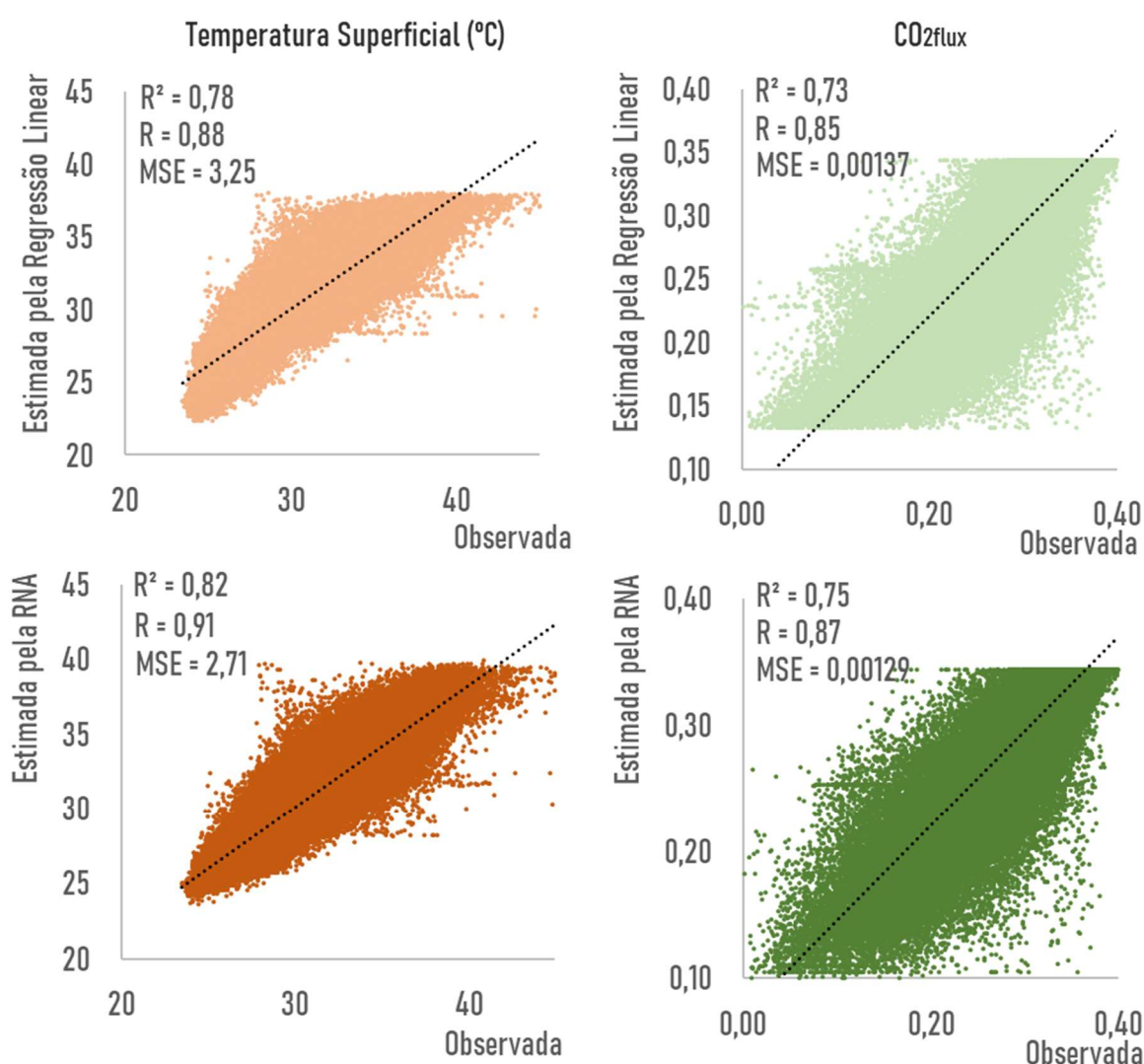


Figura 111. Comparação entre as estimativas da temperatura superficial e do índice CO_{2flux} , com base nas estimativas realizadas por meio de regressões lineares e de RNAs.
(Elaborada pela autora, 2022)

Quanto à clusterização dos dados, são apresentados, na Figura 112, os gráficos dos valores da estatística *pseudo-f*, para o conjunto de variáveis determinantes da temperatura superficial e do índice CO_{2flux} , tendo em vista o agrupamento de 2 a 15 grupos. Considerando os resultados da estatística, para as variáveis relacionadas ao agrupamento das temperaturas, foram utilizados 6 grupos. Já, para a análise multivariada das variáveis associadas ao CO_{2flux} , foram utilizados 4 grupos.

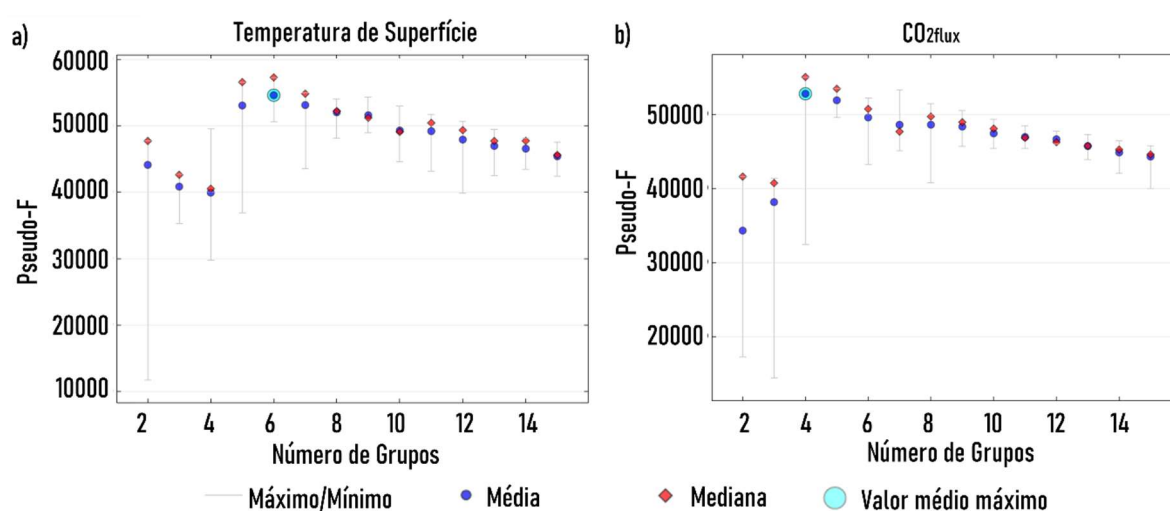


Figura 112: Estatística pseudo-F, considerando a composição do uso e ocupação do solo e: a) a temperatura de superfície; e b) o índice CO_{2flux} .

(Elaborada pela autora, 2022)

A variável que melhor discrimina os grupos, tanto no agrupamento das temperaturas superficiais, quanto nos índices de CO_{2flux} , é a proporção de vegetação arbustiva na composição do uso e ocupação do solo ($R^2 = 0,87$ e $R^2 = 0,86$, respectivamente). No agrupamento das temperaturas superficiais, conforme esperado, a altitude também se mostra uma variável distintiva entre os grupos. Cabe destacar que os altos valores de R^2 (cf. Tabela 10 e Tabela 11) também indicam que todas as variáveis possam contribuir para a distinção de grupos.

Na Tabela 10, são apresentados os principais resultados da análise multivariada, que considera, para o agrupamento em 6 grupos, as variáveis: composição do uso e cobertura do solo; a altitude; e a temperatura superficial. A análise dos resultados da clusterização possibilita a identificação de alguns padrões importantes. O primeiro deles está relacionado à presença da água na composição do uso e cobertura do solo. Observa-se, nos grupos de 1 a 5, que a

proporção da área coberta por água não ultrapassa os 34%. O grupo 6 (marrom), por sua vez, é caracterizado pela presença da referida classe, em parcela superior a 31%, e por um padrão específico de ocorrência de temperaturas superficiais medianas.

A presença da vegetação arbustiva, acompanhada por outras classes de uso e cobertura do solo, em menores proporções, caracteriza os grupos com temperaturas superficiais abaixo da média, como observado nos grupos 1 (azul) e 4 (amarelo). A altitude é o principal fator contribuinte para a diferenciação entre esses grupos, sendo o grupo 1 (azul) caracterizado por altitudes baixas e medianas, e o grupo 4 (amarelo), por altitudes maiores. Conforme esperado, o grupo 4 (amarelo), associado às maiores altitudes, apresentou temperatura superficial ligeiramente inferior ao grupo 1 (azul).

Uma associação semelhante ocorre entre os grupos 2 (vermelho) e 5 (roxo). Em ambos a presença da vegetação arbustiva varia de baixa a mediana, com variadas composições complementares, em relação à presença de área urbana e de vegetação rasteira e solo exposto. O grupo 2 (vermelho), entretanto, é caracterizado por estar associado a altitudes de medianas a altas, enquanto o grupo 5 (roxo), a altitudes menores. Também nesse caso, conforme esperado, o grupo 5 (roxo) apresentou temperaturas inferiores àquelas observadas no grupo 2 (vermelho).

O grupo 3 (verde) é caracterizado pela menor média, em termos da presença de vegetação arbustiva, e pela maior proporção de área urbana, na composição do uso e cobertura do solo. Nessas áreas, são encontradas as maiores temperaturas, dentre todos os grupos, atingindo, em média, 35,7°C.

Tabela 10 – Análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo, altitude e temperaturas de superfície.

Variável	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Vegetação Arbustiva $R^2 = 0,87$	1		0,23	1,00	0,87
	2		0,00	0,63	0,20
	3		0,00	0,63	0,08
	4		0,34	1,00	0,91
	5		0,00	0,65	0,17
	6		0,00	0,68	0,24
Altitude $R^2 = 0,81$	1		5,00	264,00	95,42
	2		149,00	580,00	368,20
	3		5,00	505,00	55,23
	4		183,00	655,00	379,91
	5		4,00	227,00	70,39
	6		6,00	628,00	131,34
Área Urbana $R^2 = 0,79$	1		0,00	0,52	0,04
	2		0,00	0,90	0,15
	3		0,20	1,00	0,65
	4		0,00	0,61	0,04
	5		0,00	0,51	0,13
	6		0,00	0,57	0,09
Água $R^2 = 0,78$	1		0,00	0,32	0,00
	2		0,00	0,34	0,01
	3		0,00	0,32	0,00
	4		0,00	0,34	0,01
	5		0,00	0,32	0,00
	6		0,31	1,00	0,62
Vegetação Rasteira e Solo Exposto $R^2 = 0,76$	1		0,00	0,50	0,09
	2		0,00	1,00	0,64
	3		0,00	0,68	0,27
	4		0,00	0,43	0,05
	5		0,22	1,00	0,69
	6		0,00	0,52	0,05
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,73$	1		24,37	38,21	29,03
	2		24,24	34,11	28,15
	3		26,21	52,39	35,70
	4		23,48	31,89	25,95
	5		26,06	41,19	32,00
	6		23,80	44,81	29,28

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Na Figura 113 é apresentado o mapeamento dos grupos que consideram, simultaneamente, as variáveis de composição do uso e ocupação do solo, altitude e temperaturas de superfície.

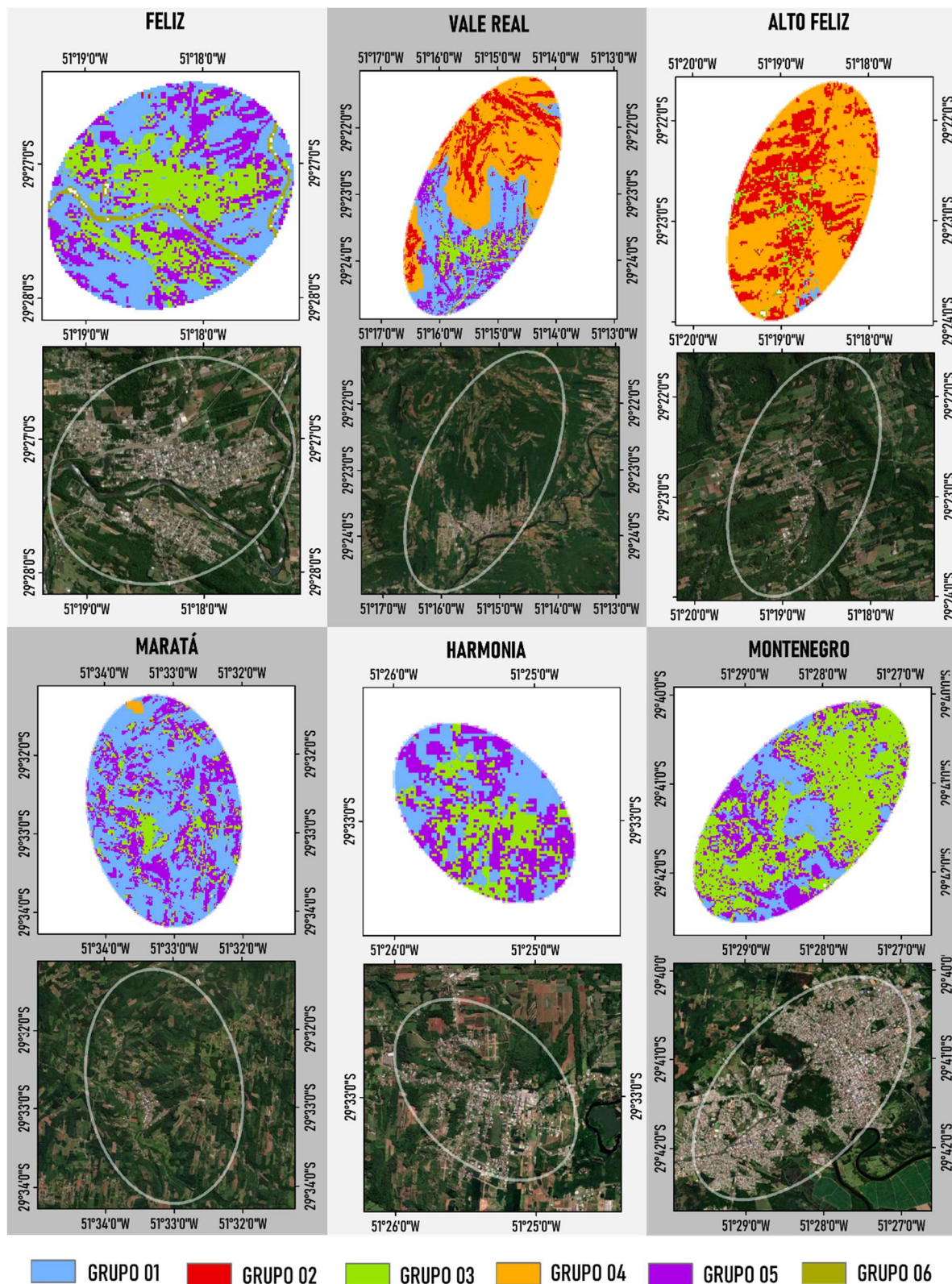


Figura 113: Grupos da análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo, altitude e temperaturas de superfície. (Elaborada pela autora, 2022)

Na Tabela 11, são apresentados os resultados da análise multivariada, que considera as variáveis de composição do uso e cobertura do solo e o índice de CO_{2flux} , para a clusterização em 4 grupos. A presença da água, na composição do uso e cobertura do solo, também revela um padrão específico. Nos grupos de 1 a 3, foi observado que a proporção de área coberta por água, em qualquer caso, não ultrapassa os 33%. O grupo 2 (vermelho), por sua vez, é caracterizado pela presença da cobertura por água em parcela superior a 31%, e por valores relativamente baixos do índice CO_{2flux} . Tal padrão pode ser explicado, não apenas pela natureza da superfície da classe em questão, mas, também, pela presença significativa de área urbana em suas proximidades, uma vez que os corpos d'água exerceram influência no desenvolvimento dos centros urbanos, na área de estudo (cf. seção 5.1).

O grupo 1 (azul) é caracterizado por altos índices de vegetação arbustiva em sua composição e cobertura do solo. Outrossim, apresenta baixa proporção de área urbana, vegetação rasteira e solo exposto que, embora variáveis, não incluem os valores mais altos. Devido à tal composição, o seu índice CO_{2flux} é o mais alto, quando comparado ao de todos os demais grupos.

Já o grupo 3 (verde) é caracterizado por baixas proporções de vegetação arbustiva e área urbana, e variáveis proporções de vegetação rasteira e solo exposto. Tal variabilidade de composição explica a ocorrência de índices de CO_{2flux} correspondentemente variáveis, uma vez que a atividade fotossintética nessas áreas varia, conforme o estágio de crescimento vegetal, e é nulo, em áreas de solo exposto.

O grupo 4 (amarelo), por sua vez, apresenta a menor proporção média de vegetação arbustiva, enquanto as áreas urbanizadas apresentam os maiores índices de CO_{2flux} . Ainda que a vegetação rasteira e solo exposto sejam variáveis nesse grupo, a ocorrência majoritária da classe urbana ocasiona os menores índices de CO_{2flux} .

Tabela 11 – Análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo e do índice CO₂flux.

Variável	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Vegetação <i>R</i> ² = 0,86	1		0,17	1,00	0,88
	2		0,00	0,68	0,24
	3		0,00	0,72	0,18
	4		0,00	0,76	0,08
Área Urbana <i>R</i> ² = 0,80	1		0,00	0,82	0,04
	2		0,00	0,57	0,09
	3		0,00	0,56	0,13
	4		0,14	1,00	0,64
Água <i>R</i> ² = 0,78	1		0,00	0,32	0,01
	2		0,31	1,00	0,62
	3		0,00	0,31	0,00
	4		0,00	0,33	0,00
Vegetação Rasteira e Solo Exposto <i>R</i> ² = 0,76	1		0,00	0,49	0,07
	2		0,00	0,53	0,05
	3		0,20	1,00	0,69
	4		0,00	0,77	0,28
CO ₂ flux <i>R</i> ² = 0,68	1		0,13	0,48	0,33
	2		0,00	0,38	0,25
	3		0,07	0,41	0,26
	4		0,01	0,38	0,18

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Na Figura 114 é apresentado o mapeamento dos grupos, que foram identificados por meio da análise multivariada. Os grupos resultam da composição sinérgica das variáveis de composição do uso, ocupação do solo e do índice CO₂flux.

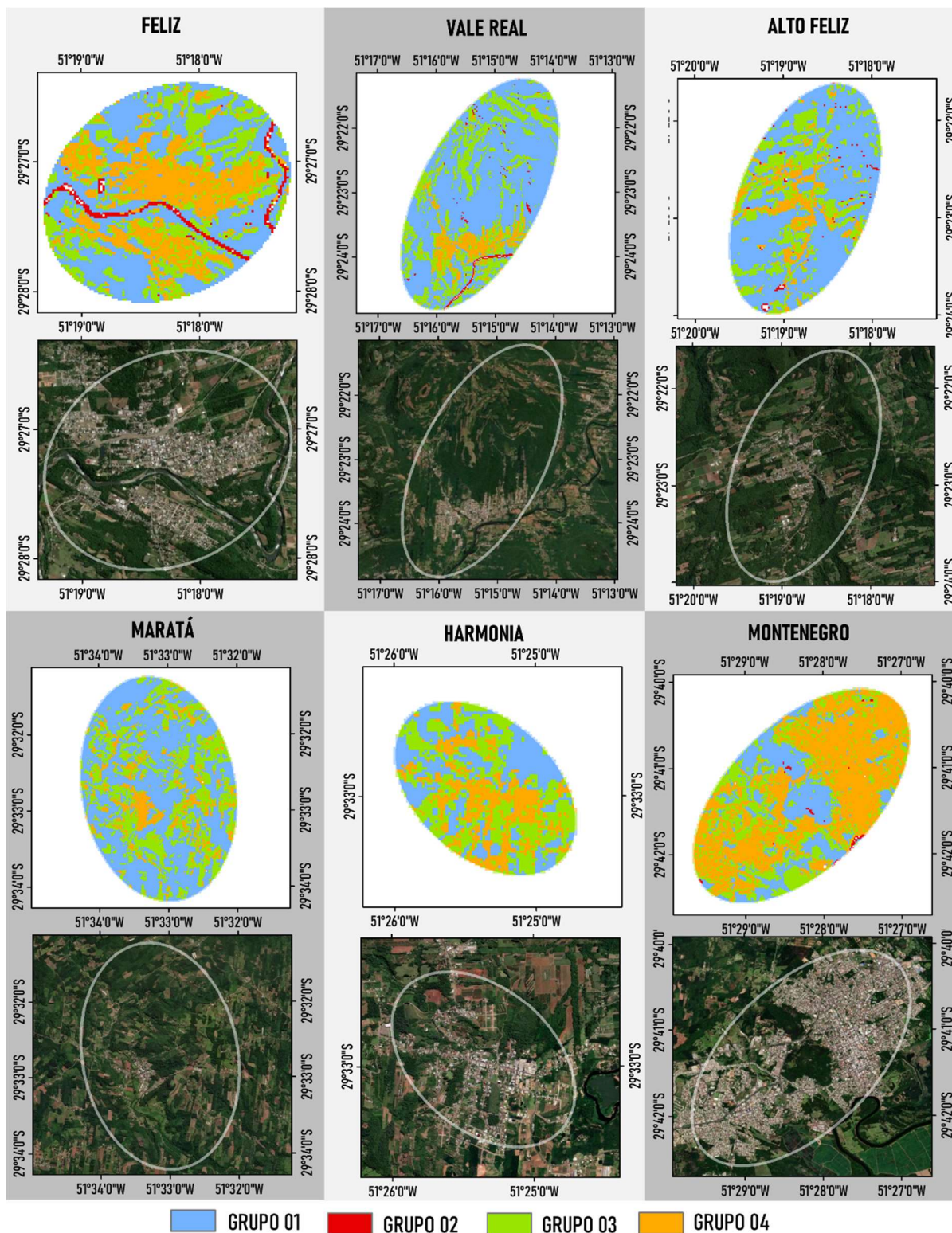


Figura 114: Grupos da análise multivariada da composição do uso e ocupação do solo e do índice CO_{2flux} .
(Elaborada pela autora, 2022)

A influência da vegetação na manutenção do equilíbrio ambiental é, desta forma, destacada por sua função estabilizadora dos marcadores de temperatura e, também, por sua capacidade de sequestro de carbono da atmosfera. Entretanto, foi verificado que diferentes composições e formas da presença da vegetação, na ocupação urbana, podem influenciar significativamente em sua eficiência na regulação térmica e na retirada de dióxido de carbono da atmosfera.

A presença da vegetação, em diferentes padrões da paisagem urbana, tem impacto sobre diferentes escalas. A consideração de sua influência na escala intraurbana também é de fundamental importância, uma vez que sua presença irá impactar em questões, como os fluxos de materiais e energia na paisagem. Nesse sentido, é importante que sejam analisadas as possíveis relações entre os distintos espaços verdes – aqui caracterizados por diferentes métricas da paisagem – e suas respostas, em termos da temperatura de superfície e da sua eficiência quanto ao sequestro de CO₂ da atmosfera.

Nesse sentido, as áreas verdes dos centros de densidade populacionais dos municípios de Alto Feliz, Feliz, Harmonia, Maratá, Montenegro e Vale Real foram agrupadas, considerando suas métricas de área, perímetro, continuidade, distância da mancha de mesma classe mais próxima e dimensão fractal. A análise multivariada resultou na classificação das manchas em 5 grupos, discriminados na Tabela 12. Observa-se que a métrica que melhor diferencia os grupos é a área das manchas ($R^2 = 0,93$), seguida do perímetro das manchas ($R^2 = 0,85$). As métricas de distância entre manchas de mesma classe e de continuidade, ainda que em menor magnitude, também discriminam de forma satisfatória os grupos estabelecidos. Ambas apresentam, respectivamente, $R^2 = 0,63$ e $R^2 = 0,61$. A métrica que se mostrou menos relevante, quanto à caracterização dos grupos, foi a dimensão fractal, com $R^2 = 0,50$.

Tabela 12 – Análise multivariada das métricas das áreas de vegetação arbustiva.

Variável	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Área (m ²) <i>R</i> ² = 0,93	1		963.672	3.140.712	1.605.795
	2		4	24	7
	3		8	801.964	866
	4		4	1876	33
	5		9.009.250	9.009.250	9.009.250
Perímetro (m) <i>R</i> ² = 0,85	1		77.836	349.976	155.113
	2		8,00	20,00	10,53
	3		16,00	76.352	148,28
	4		8,00	292,00	24,35
	5		545.256	545.256	545.256
Distância Euclidiana do Vizinho mais Próximo (m) <i>R</i> ² = 0,63	1		4,00	4,00	4,00
	2		4,00	15,00	5,70
	3		4,00	18,00	5,73
	4		12,81	93,00	21,12
	5		4,00	4,00	4,00
Continuidade <i>R</i> ² = 0,61	1		0,94	0,96	0,95
	2		0,00	0,50	0,10
	3		0,08	0,96	0,53
	4		0,00	0,91	0,33
	5		0,97	0,97	0,97
Dimensão Fractal <i>R</i> ² = 0,50	1		1,43	1,52	1,47
	2		1,00	1,12	1,03
	3		1,00	1,56	1,19
	4		1,00	1,50	1,09
	5		1,48	1,48	1,48

Fonte: Elaborada pela autora, 2022

As manchas pertencentes ao Grupo 1 (azul), que estão presentes nos municípios de Alto Feliz, Maratá e Vale Real, são caracterizadas por grandes áreas e perímetros. Constituem grandes áreas contínuas e próximas às manchas de mesma classe, estando distanciadas entre si de apenas 4 metros. As formas das manchas do grupo também são caracterizadas pela sua maior irregularidade, quando comparadas às dos demais grupos.

O Grupo 5 (roxo) também tem como principal característica apresentar grandes áreas e perímetros, proximidade a outros fragmentos de mesma classe e irregularidade de forma. Este grupo é integrado por apenas uma única mancha contínua, situada no município de Vale Real.

Os demais grupos são constituídos por áreas verdes fragmentadas, e estão presentes nos seis municípios analisados, com manchas que possuem áreas variando entre 4 m² e 801.964 m².

O Grupo 2 (vermelho) é caracterizado como apresentando as menores manchas de vegetação arbustiva. Assim, é caracterizado como possuindo menores áreas e perímetros, pela maior fragmentação e pela menor continuidade das manchas. Nesse grupo, as distâncias das áreas verdes mais próximas entre si variam entre 4 e 15 metros.

O Grupo 4 (amarelo) apresenta semelhanças ao Grupo 2, ainda que contenha áreas, perímetros e continuidades em níveis ligeiramente superiores. A diferença mais destacável, todavia, está na distância à mancha de vegetação arbustiva mais próxima, com média de 21 metros, que indica a existência de fragmentos de área verde mais isolados.

O Grupo 3 (verde), por sua vez, apresenta área e perímetro médio intermediários, áreas verdes mais contínuas, e localização próxima a outras manchas de mesma classe.

Considerando as particularidades de cada grupo, foram analisadas, quantitativamente, as relações complexas entre os padrões paisagísticos dos fragmentos de vegetação arbustiva, as variáveis de temperatura superficial e a sua capacidade de sequestro de carbono, conforme apresentado na Figura 115.

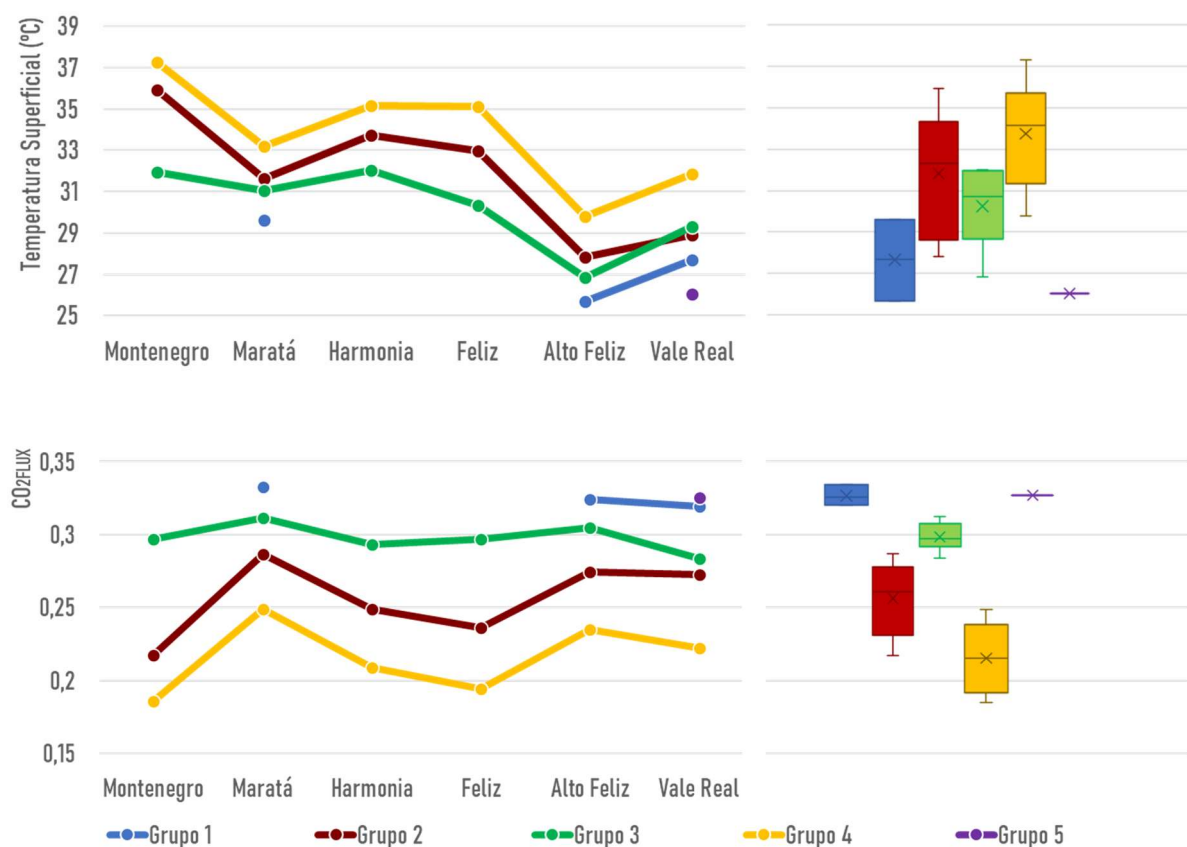


Figura 115: Temperaturas superficiais e CO₂flux. nos grupos da classe de vegetação arbustiva. (Elaborada pela autora, 2022)

Observa-se que as temperaturas superficiais seguem um padrão, em todos os municípios, que pode ser caracterizado como apresentando as menores temperaturas, nos grupos de maior área e perímetro. A fragmentação dos espaços verdes e a distância entre as manchas de mesma classe também exercem influência em suas temperaturas médias. As maiores diferenças de temperatura superficial, entre grupos de vegetação arbustiva com diferentes características, são observadas nos municípios de Montenegro (5,36 °C, entre os grupos 3 e 4) e Vale Real (5,80 °C, entre os grupos 4 e 5). É importante ressaltar que, embora Montenegro apresente a menor taxa de vegetação arbustiva, entre os municípios avaliados (26,8% da área total de estudo, cf. Tabela 5), Vale Real é identificado como apresentando a maior proporção da referida classe de uso e ocupação do solo (64,6%, cf. Tabela 5). É possível inferir, dessa forma, que a presença das áreas urbanizadas tem a capacidade de influenciar, não apenas as temperaturas superficiais dentro da própria classe, mas, também, os fragmentos de vegetação inseridos dentro da área urbanizada, como ocorre no município de Montenegro. O maior percentual de vegetação

arbustiva no uso e ocupação do solo local, por sua vez, pode influenciar na estabilização das temperaturas superficiais, como observado em Vale Real.

Em relação aos índices de CO_{2flux} , foi verificado que a eficácia fotossintética da vegetação é menor nos grupos caracterizados por manchas de menor área. Além disso, a continuidade e proximidade a outras áreas verdes contribuem para o aumento do índice de CO_{2flux} . Ressalta-se, contudo, que, entre os grupos de maior área, há um ganho pouco expressivo em eficácia no processo de sequestro de dióxido de carbono da atmosfera. Nesta direção verificou-se que mesmo que o aumento da área média seja de 82,2%, entre os Grupos 1 e 5, o aumento do índice de CO_{2flux} é de apenas 1,9%.

Desta forma, verificou-se que, além da presença da vegetação arbustiva, as características da paisagem urbana também influenciam diretamente na melhoria da qualidade ambiental dos aglomerados urbanos. A compreensão e quantificação de tais influências pode conduzir a projetos urbanísticos, bem como a planos, que considerem esses espaços, seja nas áreas verdes institucionais, seja na concepção dos espaços públicos, ou mesmo em propriedades particulares, de modo a entender a cobertura vegetal como uma rede sistêmica. A análise desenvolvida indica que as métricas da paisagem, quando aplicadas ao estudo do ambiente intraurbano, representam, não apenas chaves interpretativas sobre variáveis importantes, mas também têm o potencial de serem aplicadas enquanto parâmetros de projeto urbano.

A consideração da complexidade e das múltiplas funções dos espaços, dentro dos sistemas urbanos requer, por sua vez, abordagens inovadoras para seu planejamento e design. Neste contexto, tendo em conta a importância dos espaços verdes na composição de um ambiente urbano equilibrado e saudável, o presente estudo propõe uma análise orientada por dados, para auxiliar a identificação estratégica de áreas disponíveis, que possam hospedar a produção urbana de alimentos, considerando, sinergicamente, diversas variáveis representativas, que serão apresentadas na seção 5.4.

5.4 SISTEMAS ALIMENTARES URBANOS

Atualmente, grande parte dos processos de produção e consumo de alimentos, bem como a gestão de resíduos a eles associada, são conduzidos de modo insustentável. Conforme destaca Gliessman (2015), a energia utilizada pela agricultura industrial para produzir, processar,

transportar e comercializar alimentos é muito superior à energia contida nos próprios alimentos. Além disso, a maior parte dessa energia provém de combustíveis fósseis, fontes com estoques finitos e de alto impacto ambiental.

É necessária, pois, a transição para novos procedimentos, em direção à sustentabilidade. As cidades são cenários propícios para o desenvolvimento de ações nessa direção, visto que, abrigando grandes concentrações populacionais, tais novos procedimentos resultariam em impactos ambientais positivos muito significativos. Ainda em 1976, em debates na Conferência Habitat I, mesmo formas menos impactantes de ligação entre o meio rural e o urbano foram reconhecidas como essenciais para se alcançar uma urbanização mais sustentável, em assentamentos humanos de todos os tamanhos. Um sistema alimentar urbano integrado, tal como o proposto no conceito de CPUL (*Continuous Productive Urban Landscape* - Paisagem Urbana Produtiva Contínua), pode contribuir para o estabelecimento de uma **paisagem produtiva** nas cidades, que inclua toda a cadeia de: produção, processamento, distribuição, comercialização, consumo e gestão de resíduos. Logo, o cultivo de alimentos em áreas urbanas é um dos elementos-chave para a promoção efetiva dessa cadeia de produção e, consequentemente, de tal paisagem mais sustentável.

As soluções voltadas à agricultura são indissociáveis de inúmeros fatores, tais como aqueles relacionados à água, à energia, ao uso do solo, às emissões de carbono, à demografia, à urbanização, à ecologia (mudanças climáticas) e, evidentemente, à alimentação. Em última instância, há que se reconhecer que essas questões são também interdependentes (MORIN, 2013). Um sistema alimentar urbano é, desta forma, um **sistema adaptativo complexo**, pois está relacionado, tanto a fatores externos, como a mudanças climáticas e, ainda, a fatores internos, que colocam em movimento uma cadeia de eventos (FOOD 2030 EXPERT GROUP, 2018).

Desde o final do século passado, o cultivo de alimentos em nível doméstico e em hortas comunitárias passou a ser reconhecido como de enorme importância, inclusive como uma política alternativa de redução da pobreza e melhoria das condições alimentares das famílias no Brasil. Jardins comunitários foram implantados em áreas centrais; leis e programas focados nas várias expressões da agricultura urbana foram desenvolvidos (BRANCO; ALCÂNTARA, 2011; NAGIB; NAKAMURA, 2020). Entretanto, a discussão sobre a produção urbana de alimentos precisa, ainda, ser ampliada e aprofundada, de maneira a incluí-la na rotina do planejamento urbano.

Na prática, tanto a compreensão, quanto a operacionalização, de um sistema alimentar necessitam de abordagens que considerem, tanto suas complexidades processuais, quanto a forma sistêmica em que se apresentam. Como discorrem Achterbosch et al. (2019), duas etapas são fundamentais neste processo: i) a definição e identificação do sistema alimentar, em termos de componentes, estrutura, fluxos, atores e vínculos; e ii) a utilização de uma abordagem sistêmica, para entender e gerenciar os desafios associados à implementação de sistemas alimentares mais racionais.

Em função de seu caráter multifuncional, a agricultura urbana poderá estabelecer uma grande variedade de serviços ecossistêmicos. Entre os benefícios da agricultura urbana no desenvolvimento sustentável de uma cidade, destacam-se: a valorização e o uso ativo de vazios urbanos; a participação cidadã, por meio da manutenção e uso produtivo dos espaços; a melhoria das condições ambientais; a oferta de uma alternativa de lazer para diversas faixas etárias; e a promoção de hábitos alimentares mais saudáveis (NAGIB; NAKAMURA, 2020; SILVA; SATTTLER, 2021)

Considerando a variedade de serviços ecossistêmicos desempenhados por esses espaços, são necessárias ferramentas que auxiliem na identificação de padrões de múltiplas naturezas. Neste sentido, a presente seção tem por objetivo: traçar um perfil geral da produção hortícola e dos riscos decorrentes de impactos, que possam estar associados a essa busca por uma maior segurança alimentar; identificar a conexão entre a produção agrícola e os centros de densidade populacional; e apresentar uma análise multivariada, como suporte à identificação de áreas disponíveis para a produção urbana de alimentos.

5.4.1 Detalhamento da metodologia

Na primeira etapa, foi traçado um perfil geral da produção hortícola nos municípios do Vale da Felicidade, a partir de consulta a dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2017). Em um segundo momento, foi realizado um levantamento, a fim de identificar o tipo de propriedade das terras destinadas à produção hortícola, bem como daquelas associadas à agricultura familiar, tendo por referência as diferentes classificações adotadas para áreas de produção. Da mesma forma, a produtividade foi calculada por meio da área média cultivada, destinada a cada produto de horticultura, com base nos dados disponíveis.

Nestes cálculos, foram utilizadas informações referentes à quantidade de estabelecimentos produzindo alimentos da horticultura, por área, quantificando-se a sua produção. Vale ser mencionado que, no levantamento do Censo Agropecuário (IBGE, 2017), os dados referentes à produção de alguns tipos de cultura não são disponibilizados, no sentido de manter o sigilo de dados de interesse dos respectivos produtores. É importante ressaltar que tal condição de indisponibilidade de dados ocorre apenas pontualmente, como, por exemplo, nos casos em que existam apenas um ou dois produtores no setor censitário avaliado. Desta forma, entende-se que essa lacuna de informação não traz prejuízos significativos para a análise, dada a quantidade pouco expressiva de informações ocultadas. Buscou-se aprofundar a avaliação daqueles dados disponibilizados, com o cálculo da produtividade, por área, para cada tipo de cultura. Para tal, foi considerada a área média de cada classe e sua respectiva produção.

Também, foram destacados os municípios que, de acordo com os dados do estudo das *Regiões de Influência das Cidades* (IBGE, 2018), apresentavam produtos oriundos da horticultura, entre os cinco produtos agropecuários de maior valor estimado. Com as informações contidas no estudo, foi possível verificar os municípios aos quais se destina tal produção.

Adicionalmente, o índice de risco de impactos para a segurança alimentar, nos municípios do Vale da Felicidade, foi avaliado, utilizando-se como base os dados disponibilizados na Plataforma Adapta Brasil (BRASIL, 2020b). Foram calculados o índice de risco médio da área de estudo e seu desvio padrão. A distribuição do índice, por município, também foi identificada, assim como a ocorrência de valores extremos.

O risco de impactos para a segurança alimentar é caracterizado em três dimensões: as ameaças climáticas; a vulnerabilidade dos sistemas socioecológicos; e a exposição desses sistemas. Desta forma, a situação dos municípios do Vale da Felicidade, em termos desses índices, foi também analisada. Além de sua classificação qualitativa, foi realizada a análise bivariada de seus componentes. A estrutura da análise bivariada e os componentes de cada dimensão do risco de impactos para a segurança alimentar estão ilustrados na Figura 116.

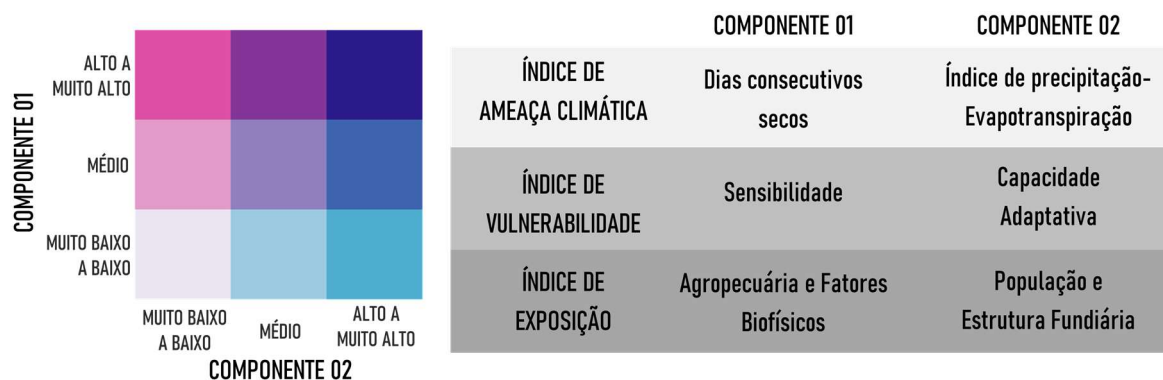


Figura 116: Análise bivariada dos componentes dos índices de: ameaça climática, vulnerabilidade e exposição. (Elaborada pela autora, 2022)

Na segunda etapa, foi identificada a conexão entre os distintos produtores rurais e os centros de densidade populacional. A localização dos produtores de cada município foi obtida no Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (IBGE, 2017). A rede viária desses municípios foi obtida através dos dados gratuitos e colaborativos presentes no *Open Street Maps* (OSM).

Para fins de identificação do ponto central dos centros de densidade populacional, foi considerado o centro médio, ponderado pelas densidades populacionais, conforme descrito na seção 5.1.1. A partir das informações espacializadas, foi feita uma análise de redes, por meio da ferramenta *Network Analysis*, do software ArcGIS. Com base nos resultados provenientes dessa análise de redes, elaborou-se o mapeamento e uma análise estatística dos caminhos percorridos pelos produtores, para alcançar os centros de densidade populacional, que identificam o principal mercado consumidor de cada local.

Na terceira etapa, os CDPs dos municípios de Feliz, Maratá, Montenegro, Alto Feliz, Harmonia e Vale Real foram analisados, buscando identificar e quantificar espaços com potencial para a implantação de hortas urbanas. Tomou-se, como referência para tal identificação, o mapeamento das classes de uso e ocupação do solo, apresentado na seção 5.3.2.2. Neste sentido, as áreas de vegetação rasteira e de solo exposto foram consideradas como áreas inseridas na paisagem urbana, potencialmente aptas para a produção de alimentos. A partir do mapeamento, realizou-se uma análise multivariada, com a finalidade de caracterizar a tais áreas, de forma integrada. Foram consideradas como interagindo, sinergicamente: a população atendida; a condição de inclusão/exclusão social das famílias residindo nas proximidades; a área contínua disponível para a implantação de hortas urbanas; e o potencial mitigador de tais

áreas, em termos de atenuação no efeito de ilhas de calor urbana, em áreas de maior temperatura superficial.

A resolução de análise adotada foi a mesma assumida na classificação do uso e ocupação do solo, na qual a unidade de informação corresponde a uma área de 4 m², correspondente ao pixel de 2 m x 2 m (cf. seção 5.3.2). Em seguimento, os indicadores de População Atendida, de Inclusão/Exclusão Social, de Contiguidade e de Temperatura Superficial foram estimados, considerando a supracitada resolução de análise, de 4 m², após as adaptações necessárias, descritas a seguir.

O **Indicador de População Atendida** foi obtido com base na população residente em um raio de 400 m, medido a partir do centro de cada pixel de 2 m x 2 m. A distância assim estabelecida é considerada um parâmetro para a criação de uma unidade de vizinhança, com orientação para o pedestre, uma vez que a maioria das pessoas admite caminhar uma distância de 400 m, antes de optar por outro meio de locomoção, conforme apresentado por Farr (2013). Para estimar a população atendida, foram consideradas as densidades populacionais, calculadas para cada setor censitário (cf. seção 5.1.2, p. 121), em uma média ponderada por área. Para cada pixel classificado como vegetação rasteira ou solo exposto, a população em condições de ser atendida foi estimada, de acordo com essa densidade média, para um raio de 400 m, e a área desse círculo resultante. Tal procedimento é ilustrado na Figura 117.



Figura 117: Fluxo ilustrativo do procedimento adotado para estimar o Indicador de População Atendida.
(Elaborada pela autora, 2022)

A informação relativa ao **Índice de Inclusão/Exclusão Social (IEX)** é obtida na resolução do setor censitário, conforme descrito na seção 5.2 (p. 148). A estimativa das condições de inclusão/exclusão social das famílias nas proximidades foi, também, realizada conforme o procedimento acima descrito, considerando um raio de 400 m, para cada pixel classificado como de vegetação rasteira ou solo exposto.

O **Índice de Contiguidade (CONTIG)**, calculado conforme apresentado na seção 5.3.2.1 (p. 195), foi utilizado como indicador de área contígua disponível para a implantação de hortas urbanas. Observa-se que a métrica referida foi obtida na resolução proposta na presente análise (2 m x 2 m), a qual possibilita sua aplicação direta na estimativa da contiguidade de áreas consideradas como oferecendo potencial para a implantação de hortas urbanas.

O **Indicador de Temperatura Superficial**, por sua vez, foi derivado das temperaturas estimadas, do satélite Landsat, e adaptado à resolução de análise por meio do interpolador da Krigagem (OLIVER e WEBSTER, 1990), conforme descrito na seção 5.3.3.1 (p. 226).

A técnica não supervisionada de aprendizado de máquinas, *k-means*, foi utilizada como suporte para mapear grupos que contemplassem, simultaneamente, questões relacionadas aos quatro indicadores considerados.

Adicionalmente, realizou-se um detalhamento dos resultados da análise multivariada, para o município de Feliz. Com base no estudo desenvolvido no contexto da elaboração do Plano Diretor Participativo, duas questões relevantes foram identificadas, em relação planejamento territorial do município: os vazios urbanos e as áreas com restrição de ocupação, em função de constituírem áreas alagáveis.

Inicialmente, as áreas consideradas como potencialmente aptas para a produção urbana de alimentos, agrupadas de acordo com o algoritmo *k-means*, foram avaliadas no recorte dos vazios urbanos do município de Feliz. As informações foram extraídas do mapeamento dos vazios urbanos na Zona de Comércio e Serviços, elaborado em 2012, no contexto da revisão do Plano Diretor Participativo do município²². Em relação às áreas alagáveis, considerou-se, como referência, o mapa proposto para o Zoneamento²³ do município, elaborado em 2020, também

²² Disponível em: <https://www.feliz.rs.gov.br/web/imgs/arquivos/feliz-vazios-57-mb.pdf>. Acesso em: 17 de mar. de 2022.

²³ Disponível em: <https://www.feliz.rs.gov.br/web/imgs/arquivos/anexo-i1601918734.pdf>. Acesso em: 18 de mar. de 2022.

no contexto da revisão do Plano Diretor Participativo. Como recorte de análise das áreas potenciais para produção hortícola, considerou-se as áreas classificadas como Zona de Ocupação Restrita (ZOR) e Zona de Ocupação Semi Restrita (ZOSR), espaços identificados como alagáveis, devido aos eventos de cheia do rio Caí.

5.4.2 Produção hortícola no Vale da Felicidade

Nos municípios do Vale da Felicidade, os produtores agrícolas são, majoritariamente, proprietários das terras onde produzem, sendo que cerca de 82% deles têm suas atividades identificadas como ligadas à agricultura familiar. Na Figura 118, são detalhadas algumas informações sobre a condição dos produtores, em relação à propriedade da terra, bem como sobre aqueles cujas atividades possam ser enquadradas dentro da, assim denominada, agricultura familiar.

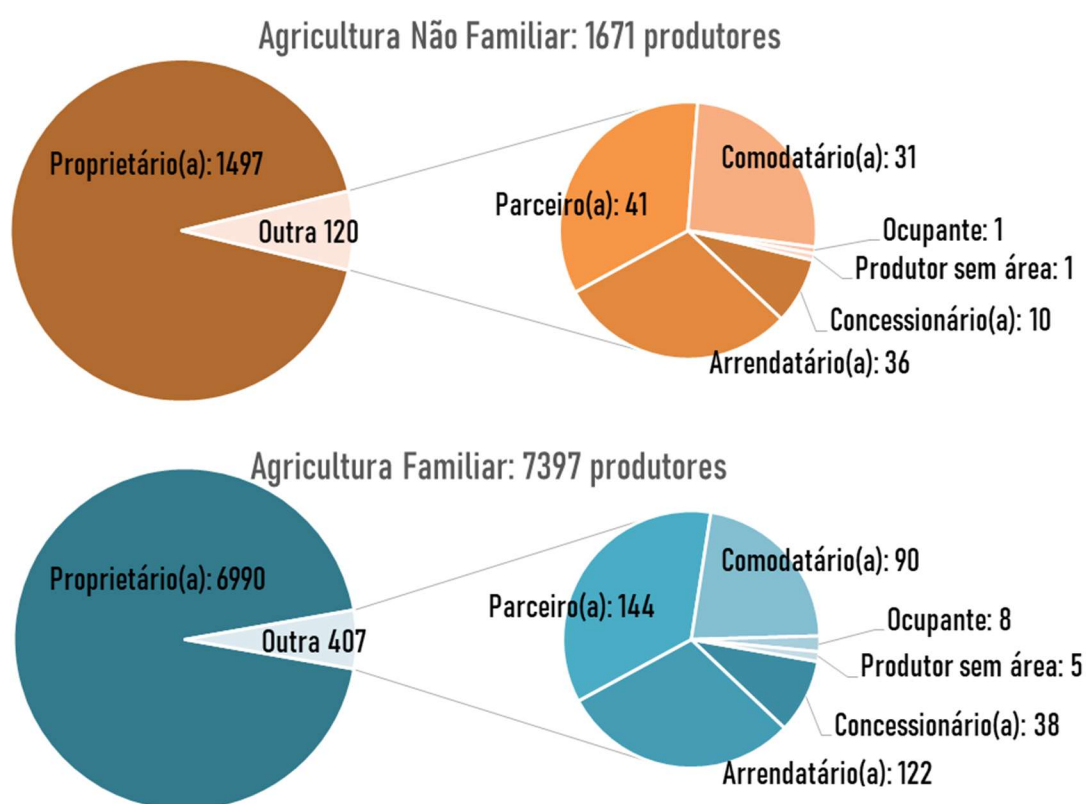


Figura 118: Condição do produtor, em relação à propriedade da terra.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em IBGE, 2017)

De acordo com o Censo Agropecuário (IBGE, 2017), existem, nos municípios do Vale da Felicidade, 894 estabelecimentos agropecuários com atividades voltadas à horticultura²⁴. Na Figura 119, é identificado o número de produtores enquadráveis, tanto na agricultura familiar, quanto na agricultura não-familiar, bem como a área média de produção, para cada uma das classes. Quanto às áreas de produção, observa-se que a maioria dos produtores atua em propriedades com áreas entre 5 e 10 ha. As áreas compreendidas entre 10 e 20 ha são identificáveis como as de maior produção, somando 3.075 ha, dos quais 93% podem ser identificadas como associadas à agricultura familiar. Não foram identificadas áreas superiores a 200 ha, que pudessem estar associadas à produção agrícola e tão-somente a um único estabelecimento. As duas propriedades com áreas entre 100 e 200 ha, maior área associada a um único estabelecimento agrícola de produção não-familiar, estão situadas no município de Capela de Santana. Já, no município de Feliz, situa-se o maior número de produtores associados à agricultura familiar e à não-familiar.

²⁴ No momento da elaboração dos resultados, não se encontravam disponíveis dados sobre a produção hortícola (tabelas 6953 e 6954) no município de São Pedro da Serra (RS). Os dados foram obtidos por meio da Plataforma SIDRA, disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017#horticultura>. Acesso em: 18 de fev. de 2022.

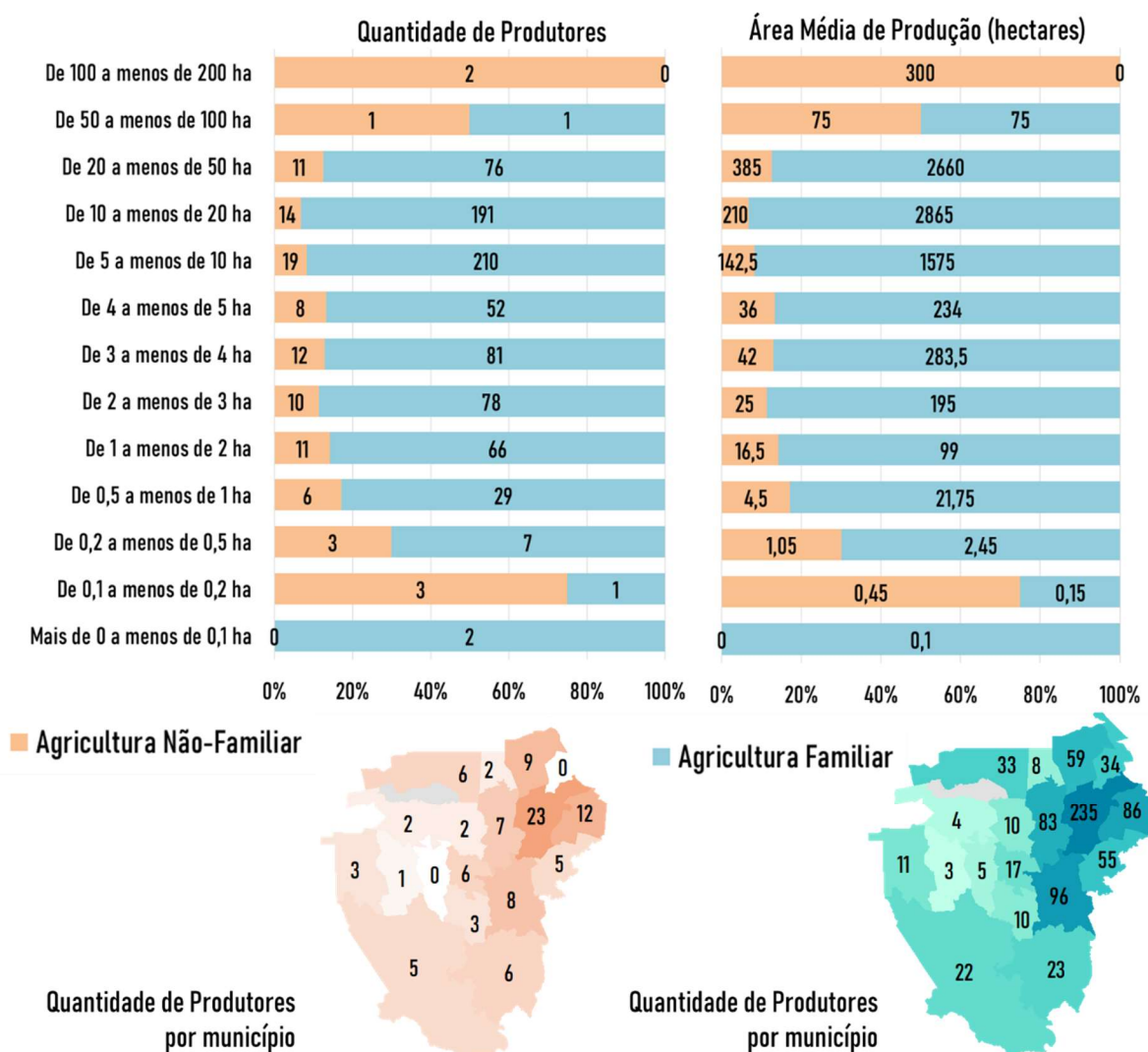


Figura 119: Número de agricultores nos municípios constituintes do Vale da Felicidade e área média de produção, na agricultura familiar e não-familiar.

(Elaborada pela autora, 2022, com base em IBGE, 2017)

Nos municípios que constituem o Vale da Felicidade, a área mínima do módulo fiscal, para que a unidade produtiva seja considerada como economicamente viável, é de 18 hectares. Esta caracterização leva em consideração algumas questões específicas, como: o tipo de exploração agrícola predominante no município; a renda resultante desta exploração; e outras formas de exploração da terra que sejam consideradas expressivas, em termos de renda auferida ou de área utilizada (LANDAU et al., 2012). Tal caracterização também leva em consideração o estabelecido pela Lei nº 11.326 (BRASIL, 2006), no que concerne ao conceito de **propriedade familiar**. A horticultura na região pode, assim, ser caracterizada como sendo praticada, predominantemente, em minifúndios e pequenas propriedades.

Na Figura 120, são apresentadas as produtividades relacionadas à produção hortícola na área de estudo, de acordo com o tamanho das áreas cultivadas. É importante destacar que as maiores produtividades foram constatadas, justamente, nos estabelecimentos agrícolas identificados como pequenas propriedades e onde os cultivos ocorreram em áreas menores.

O cultivo do morango, uma das culturas agrícolas que dão grande destaque a alguns municípios da região, resultou em uma produção de 1.865 toneladas, em 2017. É digno de nota o fato de que esta cultura apresentou uma produtividade média mais elevada nas propriedades com área de, tão somente, 0,5 a 1 hectare. Tal fato foi observado, também, quanto à produção de vagem, cuja produção, no mesmo ano, somou um total de 248 toneladas.

A produção de pepino, que totalizou 2.866 toneladas, apresentou maior produtividade em áreas de cultivo entre 1 e 2 hectares. A mesma área de cultivo também foi identificada como estando relacionada às culturas de berinjela, brócolis, pimentão, quiabo, rúcula e tomate. Observou-se, ainda, que as culturas de alface, batata-doce, beterraba, couve, couve-flor, rabanete e salsa apresentaram maiores produtividades em áreas de 2 a 3 hectares. Nas áreas de 4 a 5 hectares, o cultivo de abobrinha e repolho apresentaram maior produtividade, ao passo que nas áreas de 5 a 10 hectares são destacáveis as produções de cebolinha, espinafre, milho verde e pimenta. Apenas a produção de chuchu apresentou maior produtividade em áreas de 10 a 20 hectares.

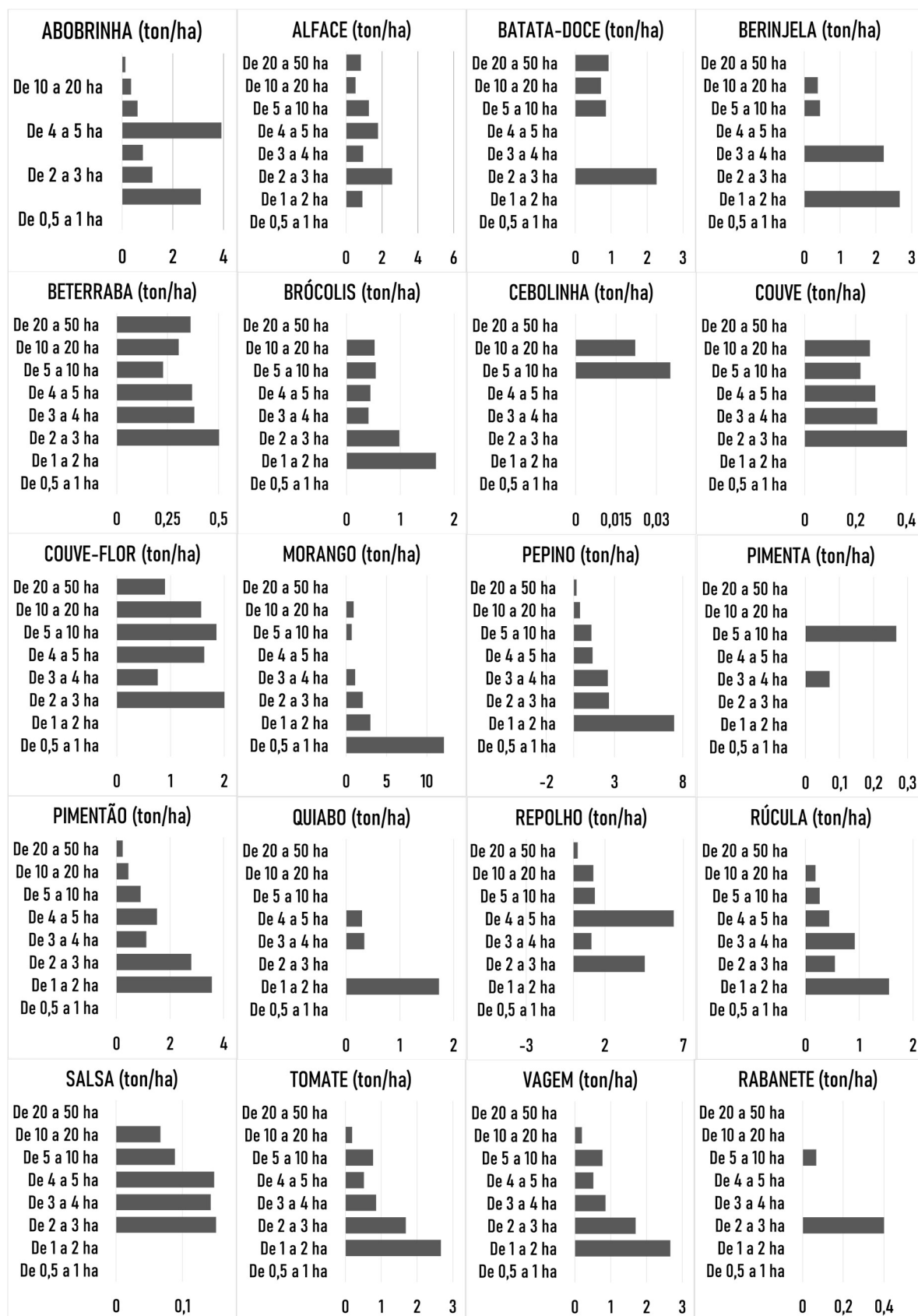


Figura 120: Produtividades, expressas em toneladas por hectare, associadas às espécies hortícolas cultivadas no Vale da Felicidade. (Elaborada pela autora, 2022, com base em IBGE, 2017)

De acordo com os dados do estudo Regiões de Influência das Cidades (IBGE, 2018), os municípios de Feliz, Linha Nova e Vale Real têm os produtos oriundos da horticultura como classificados entre os cinco produtos agropecuários de maior valor estimado para o município.

Na Figura 122, estão identificados os principais destinos da produção hortícola, com origem nos acima referidos municípios. Destaca-se, como curiosidade, que o município de Feliz, ainda que destine sua produção hortícola para as cidades de Porto Alegre (a cerca de 85 km) e Caxias Sul (a cerca de 43 km), é destinatário de 7% dos produtos originários do município de Linha Nova. Observa-se, também, que, dos três municípios referidos, ocorre a destinação de parte dos seus produtos de horticultura para municípios vizinhos apenas no município de Linha Nova, destinando, inclusive, 3% de sua produção hortícola total ao consumo local.

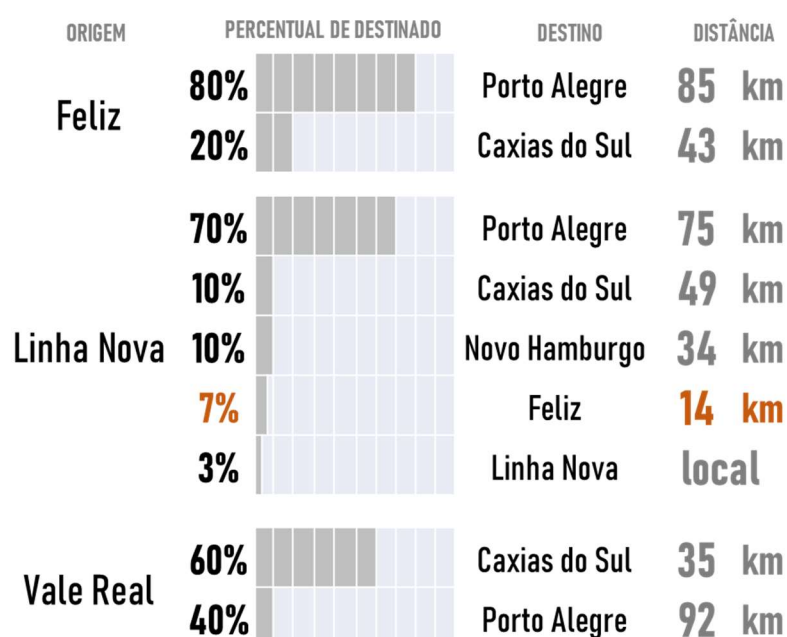


Figura 122: Destinos da produção hortícola, com origem em três municípios localizados no Vale da Felicidade.
(Elaborado pela autora, com base em dados de IBGE, 2018)

A produção sustentável demanda uma série de intervenções, que podem contemplar, desde o incentivo à produção orgânica e diversificada, até o emprego de técnicas de produção permaculturais. Nesta direção, os sistemas intensivos de produção são mais eficientes, em termos do consumo de energia, contribuindo, assim, para evitar que áreas de preservação sejam convertidas para fins agrícolas.

Merece destaque que, em direção ao incremento da produtividade hortícola doméstica, o Vale da Felicidade, sendo uma região onde predomina a agricultura familiar praticada em pequenos lotes, que são de propriedade do próprio produtor, apresenta uma condição excepcional para a sua intensificação. Isto poderia ser realizado por meio do estímulo a um sistema intensivo de produção em pequena escala, ainda mais generalizado do que aqueles que são identificados no presente estudo. Tal direcionamento poderia ser realizado em alinhamento ao destacado por Mollison e Slay (1998), que apontam pequenos lotes como “uma parte da terra que pode ser utilizada, por completo e eficientemente”, pois “o local está *sob controle*”. Os pequenos produtores e a agricultura familiar assumem, no entender desses autores, um papel fundamental no direcionamento do setor à sustentabilidade: a produção diversificada e em menor escala, que está associada a um maior cuidado e contato com a terra, é essencial para a integração dos elos das dimensões social, ambiental e econômica da sustentabilidade.

A questão está, também, diretamente associada às Metas do ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), em sua Meta 2.3, que propõe o aumento da produtividade e renda dos pequenos produtores. A descentralização da produção e o fortalecimento do pequeno produtor são fatores decisivos, igualmente, para o alcance dos demais objetivos. Nesta direção, merece também destaque a Meta de Erradicação da Pobreza (ODS 1), que, para ser alcançada, requer que a população mais vulnerável tenha garantido seu direito de controle sobre a terra, assim como acesso aos recursos naturais, às tecnologias apropriadas e a financiamentos (meta 1.4).

A produção de alimentos em áreas urbanas e periurbanas contribui para a garantia da segurança alimentar das populações em condições de maior vulnerabilidade (SILVA; SATTLER, 2021). De acordo com a Pesquisa do Orçamento Familiar (IBGE, 2020), 14% da renda das famílias brasileiras é destinada à aquisição de alimentos, conforme pode ser identificado na Figura 123. Esse índice, quando analisado segundo o ordenamento dos níveis de renda, revela uma das iniquidades ocorrentes no país: nas famílias de menor renda, as despesas para suprir a necessidade básica de alimentação representam 22% do orçamento doméstico.

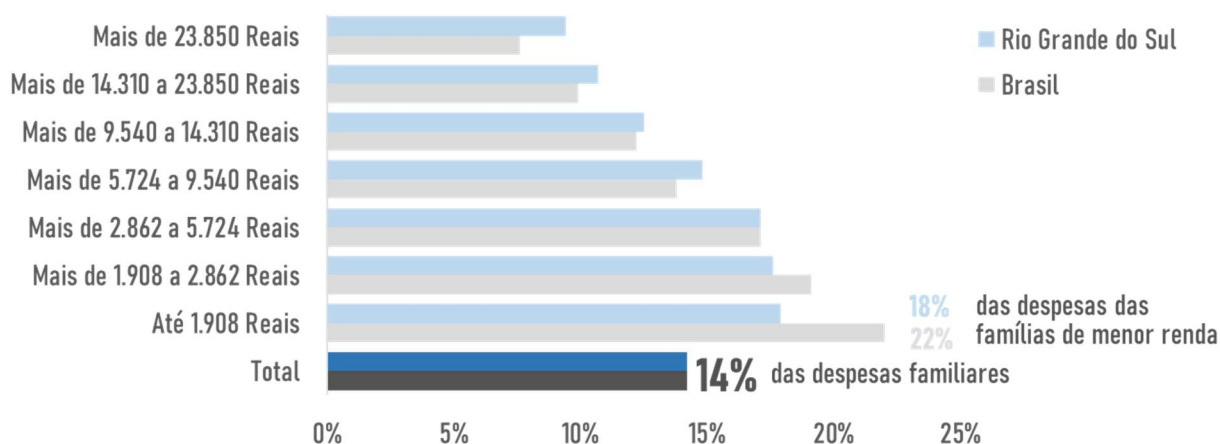


Figura 123: Despesa média mensal familiar associada à alimentação.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em dados de IBGE, 2020)

O comércio justo de alimentos produzidos localmente, incluindo-se aqueles resultantes da produção urbana, bem como a redução dos intermediários entre o produtor e os consumidores, pode ter um impacto positivo no aumento do poder aquisitivo das famílias de menor renda. Tais aspectos poderão contribuir para a Meta de Redução das Desigualdades (ODS 10), pois possibilitam uma remuneração adequada ao produtor, bem como a preservação da renda das famílias.

O estabelecimento de uma relação mais harmônica entre o meio urbano e o rural é, também, fundamental para a construção de Cidades e Comunidades Sustentáveis (ODS 11). Como explicitado na Meta 11^a, é necessário “apoiar relações econômicas, sociais e ambientais positivas, entre áreas urbanas, periurbanas e rurais, reforçando o planejamento nacional e regional de desenvolvimento” (ONU, 2015). A redução das distâncias percorridas, entre os locais de produção e os de consumo de alimentos, além de constituir uma efetiva Ação Contra a Mudança Global no Clima (ODS 13), fortalece a Meta de Consumo e Produção Sustentável (ODS 12), ao reduzir perdas e desperdícios de alimentos, ao longo das cadeias de produção e de abastecimento (Meta 12.3).

No Vale da Felicidade, os sistemas socioecológicos, relativos à segurança alimentar, estão sujeitos a riscos associados a possíveis impactos, que possam vir a ser provocados pelas mudanças climáticas, os quais foram categorizados como de baixo a médio, segundo dados da Plataforma Adapta Brasil (BRASIL, 2020b). A distribuição do Índice de Risco de Impactos para a Segurança Alimentar, por município, é ilustrada na Figura 124. Este índice apresentou um valor médio de 0,40 e desvio padrão de apenas 0,08, nos municípios da área de estudo. Destaca-se o município de Maratá, que apresentou um Índice de Risco de Impactos de 0,22,

notavelmente inferior àqueles apresentados pelos demais municípios da área de estudo, sendo considerado um *outlier* inferior. Já, o município de Vale Real apresentou o maior Índice de Risco de Impactos, na região analisada, equivalente a 0,53, sendo classificado como um risco médio. Mesmo assim, apresenta-se dentro do padrão geral da distribuição dos valores dos demais municípios da área de estudo.

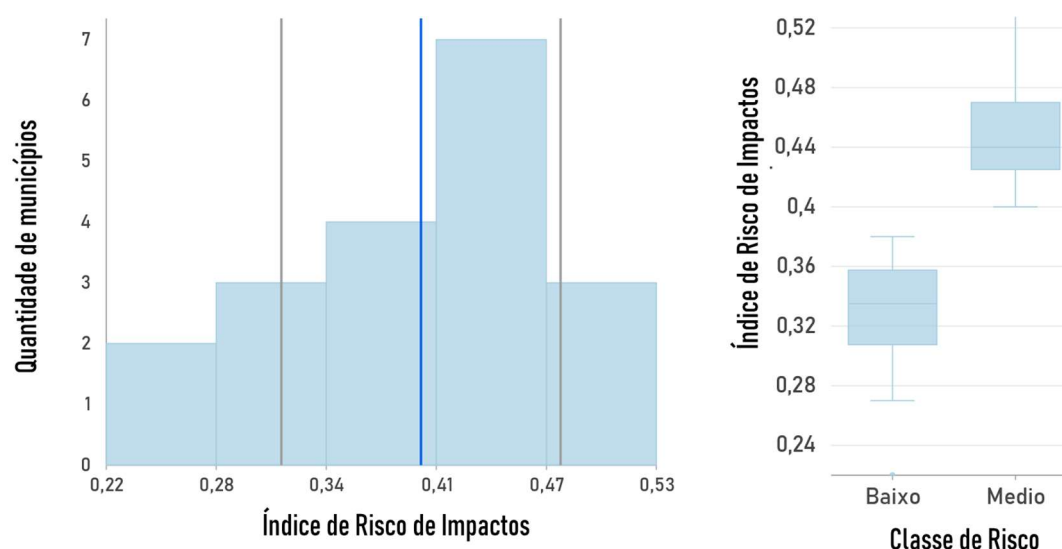


Figura 124: Índice de Risco de Impactos para a Segurança Alimentar, nos municípios do Vale da Felicidade (RS). (Elaborada pela autora, 2022, com base em dados de Brasil, 2020b).

A composição do Índice resulta da consideração das **ameaças dos eventos climáticos** relacionados à seca; da **vulnerabilidade** dos sistemas socioecológicos; e da **exposição** desses sistemas. Na Figura 125, a distribuição espacial de cada um desses subíndices é apresentada, bem como uma análise bivariada de seus componentes principais.

Observa-se que as **ameaças climáticas**, capazes de impactar de forma significativa aos sistemas socioecológicos, são consideradas baixas, em todos os municípios, seja devido à ocorrência pouco expressiva de dias consecutivos secos, seja pelo baixo índice de precipitação-evapotranspiração identificados na região.

O **índice de vulnerabilidade** é aquele com maior influência no Índice de Risco, tendo sido classificado como de nível baixo a médio, na maioria dos municípios. Este grau de vulnerabilidade é considerado alto apenas nos municípios de Alto Feliz e Vale Real, nos quais

a sensibilidade do sistema socioecológico às alterações climáticas, constitui o principal fator contribuinte. Tal fato está associado, sobretudo, à sua maior dependência de uma irrigação em grande escala e à alta dependência de receitas resultantes da produção agropecuária nestes municípios.

Já, o **índice de exposição** do sistema socioecológico é considerado alto apenas no município de São Pedro da Serra, e está associado, principalmente, ao índice de exposição, nas temáticas de população exposta e de estrutura fundiária, que reflete uma maior concentração fundiária, encontrada no município.

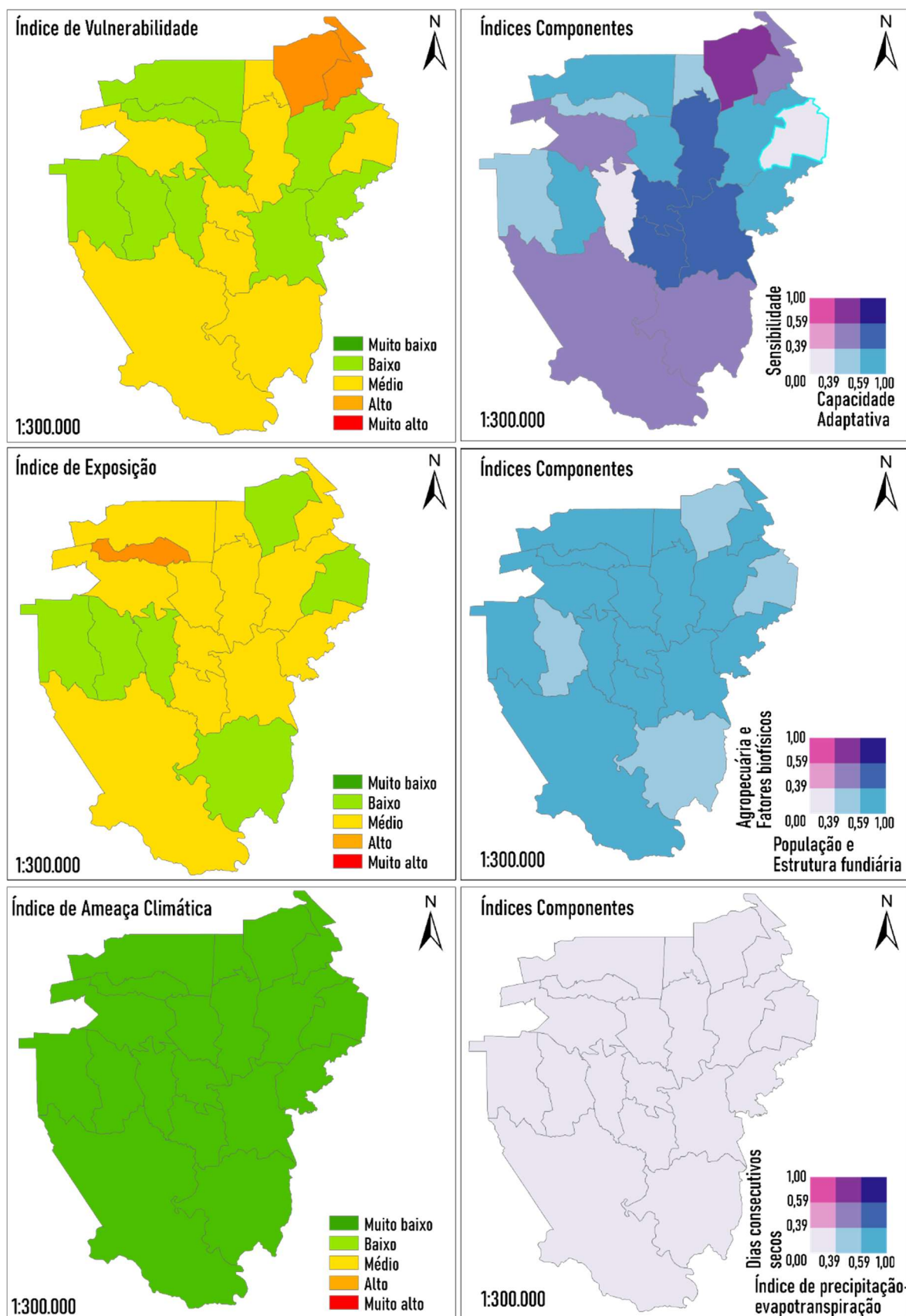


Figura 125: Índices do Risco de Impacto frente à Seca e seus componentes.
(Elaborada pela autora, 2022, com base em dados de Brasil, 2020b).

5.4.3 Conexão urbano-rural na produção hortícola

Minimizar a cadeia de suprimentos-consumo, com a contenção dos fluxos de materiais e energia, limitando-os aos necessários ao processamento local ou regional, representa um dos principais desafios a serem enfrentados, para o estabelecimento de um sistema alimentar alternativo mais sustentável (FORSTER *et al.*, 2014; KUHN, 2014).

Identificar, de forma objetiva, a conexão entre a produção e um possível polo consumidor local é fundamental para avanços em direção à sustentabilidade alimentar. Com tal propósito, foi desenvolvida uma análise da rede local de estradas, considerando a conectividade dos produtores ao centro maior, em termos de densidade populacional, para os municípios do Vale da Felicidade. Desta maneira, foi possível observar a distribuição espacial e as distâncias entre os pontos de produção agropecuária, nos diversos municípios e um potencial mercado consumidor local.

Na Figura 126, é apresentado um resumo estatístico das distâncias existentes entre os locais de produção agropecuária e o CDP daquele município ao qual estiver mais próximo.

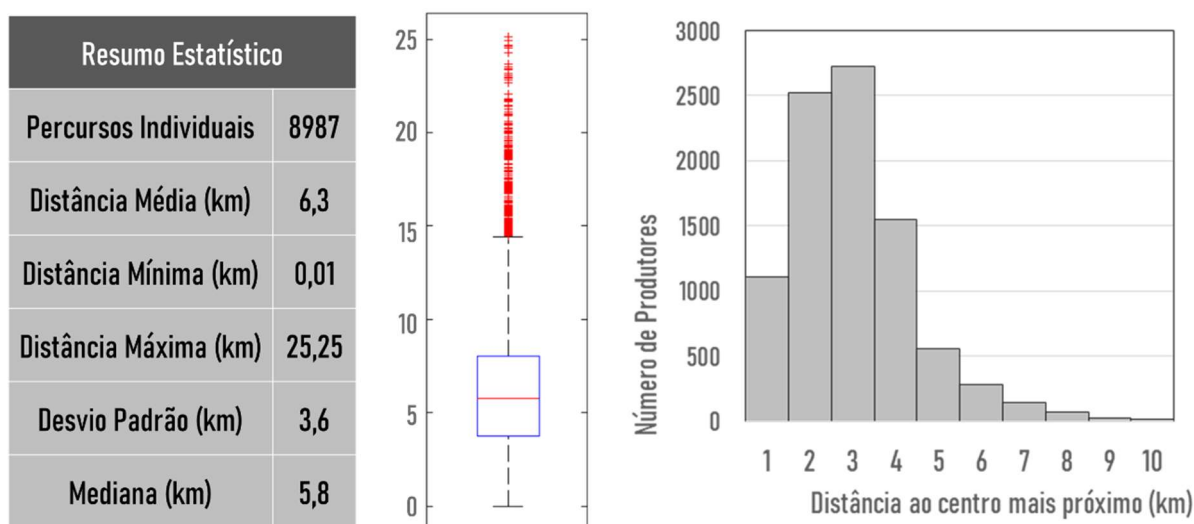


Figura 126: Distâncias entre os produtores e o CDP: resumo estatístico das distâncias de deslocamento; boxplot das distâncias; e histograma de distribuição das distâncias de deslocamento.
(Elaborada pela autora, 2022)

Ao utilizar a rede viária como conector urbano-rural, é possível verificar, de forma mais precisa, não apenas as distâncias percorridas, mas também a maneira como os locais de produção e o centro de consumo, identificados no CDP, estão conectados. A distância média de deslocamento é de apenas 6,3 km, sendo a distância máxima igual a 25,3 km. Destaca-se que cerca de 90% dos produtores se encontram a uma distância de 1,5 a 13,0 km do CDP do município mais próximo.

É importante destacar que um dos aspectos problemáticos do atual sistema alimentar global é o grande número de intermediários entre o agricultor e o consumidor. Quanto maior a distância a ser percorrida entre esses dois elementos do sistema alimentar, mais intensa se torna a mediação, orientada, em geral, por interesses corporativos. Esses intermediários são responsáveis pela absorção de até 84% do valor atribuído ao alimento. Tal realidade dificulta ao consumidor identificar a origem, o conteúdo nutritivo, o processamento e as particularidades econômicas associadas aos alimentos que consome, além de induzir o produtor a padrões de produção desconectados dos ciclos naturais (GLIESSMAN, 2015). A proximidade física entre o local de produção de alimentos e as pessoas que os consomem, identificada na região, destaca o potencial para que seja implantado um sistema alimentar mais democrático, possibilitando uma interação mais direta entre produtor e consumidor.

Além das distâncias a serem percorridas, a distribuição espacial dos estabelecimentos agropecuários também é de fundamental importância no traçado de rotas mais racionais, para que sejam conectados, não apenas os produtores ao centro, mas também os próprios produtores entre si. Conforme Gliessman (2015), no contexto do biorregionalismo agrícola, faz sentido utilizar um conceito paralelo ao de bacia hidrográfica, no tocante à distribuição de alimentos: a “bacia alimentar”. Esta pode ser entendida como um contexto geograficamente limitado de terra, de pessoas e de empresas ligadas por relações associadas a alimentos.

Na Figura 127, é possível observar a forma de conexão entre produtores e o CDP do município mais próximo. Na Figura 128, é apresentada uma distribuição espacial de estabelecimentos agropecuários. Esses dois aspectos, em conjunto, poderão orientar a localização de pontos de distribuição intermediários, que possibilitem uma maior eficiência no transporte local de alimentos, para fins de consumo também local.

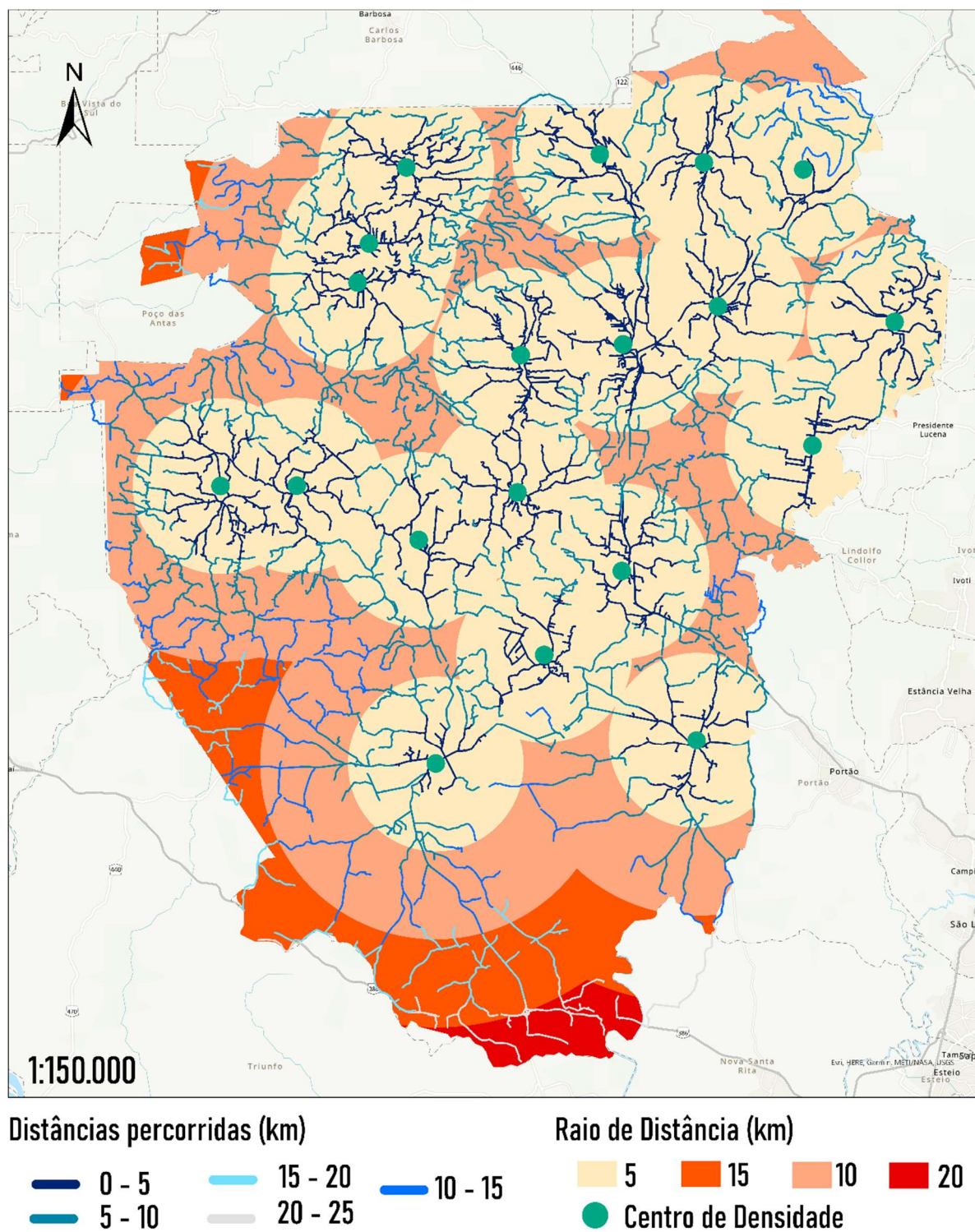


Figura 127: Conectividade entre os estabelecimentos agropecuários e os CDPs mais próximos.
(Elaborada pela autora, 2022)

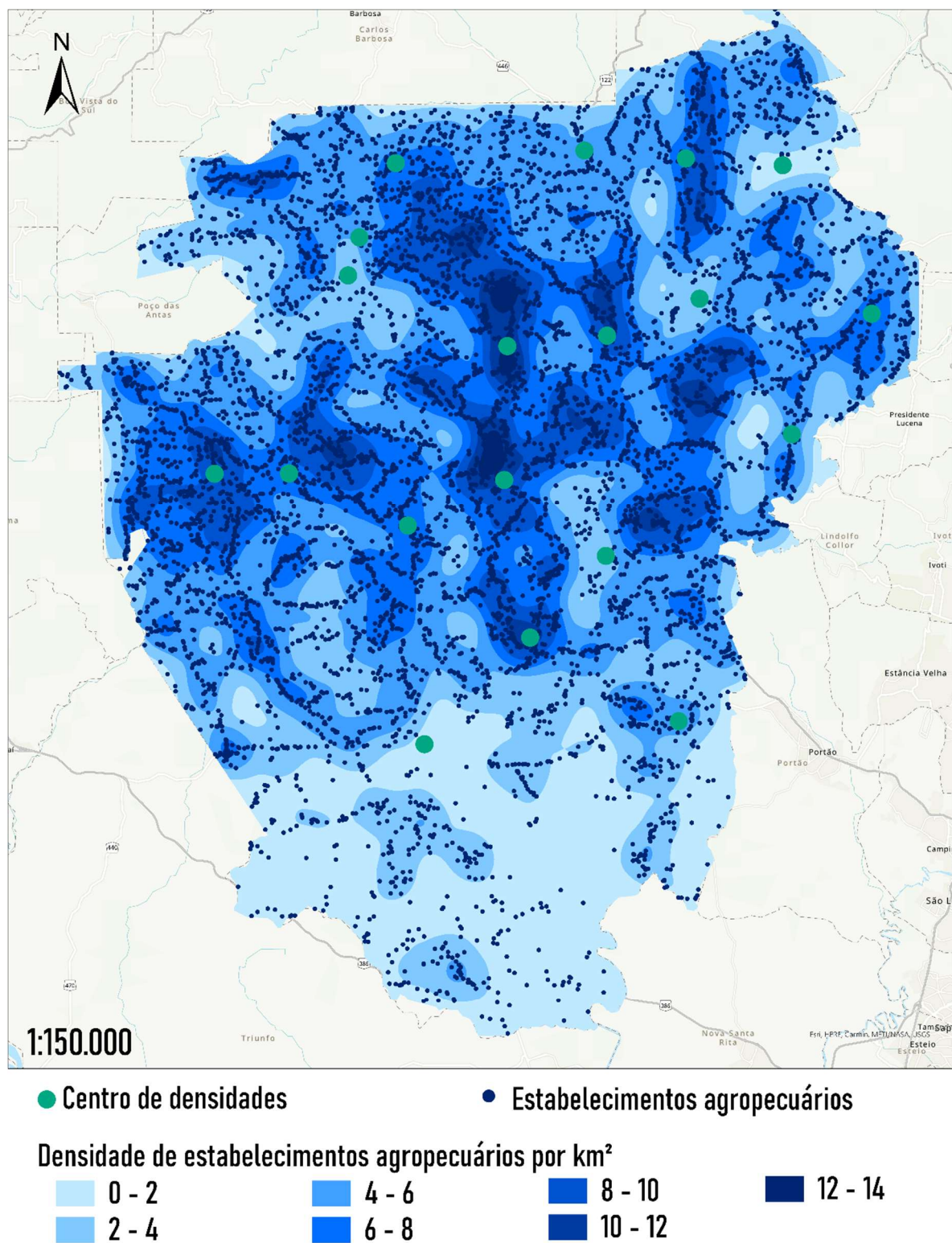


Figura 128: Distribuição de densidades de estabelecimentos agropecuários.
(Elaborada pela autora, 2022)

Embora a relação da produção agrícola com os sistemas naturais seja um aspecto fundamental para a garantia de sua sustentabilidade, o conceito de multifuncionalidade não se restringe às

paisagens rurais. O princípio básico de integrar os usos humanos da terra com as necessidades dos sistemas naturais, deve ser estendido a todas as paisagens antropogênicas, incluindo as áreas urbanizadas, para que o benefício mútuo seja maximizado. Se a separação espacial dos consumidores de alimentos e da terra na qual seus alimentos são produzidos for acentuada, isto poderá contribuir para a falta de sustentabilidade dos sistemas alimentares, razão pela qual é necessário que a distribuição espacial da presença humana na terra e sua relação com a produção de alimentos sejam consideradas (GLIESSMAN, 2015). Nesse sentido, na seção 5.4.4 serão investigadas as áreas com potencial para a produção urbana de alimentos, nos CDPs dos municípios de Alto Feliz, Feliz, Harmonia, Maratá, Montenegro e Vale Real.

5.4.4 Potencial de produção urbana de alimentos

Os princípios que orientam a interação sustentável entre agricultura e natureza, quando avaliados no contexto paisagístico mais amplo, podem ser aplicados também às áreas urbanas. As cidades podem, dentro de seus limites, apoiar a produção agrícola em pequena escala e abrigar os elementos de ambientes naturais (FORSTER *et al.*, 2014; GLIESSMAN, 2015). Além das práticas de cultivo orgânico e dos benefícios da agricultura familiar, discutidos nos itens anteriores, uma maneira de tornar mais sustentável o provimento de alimentos às populações residentes em áreas urbanas é a inserção de espaços produtivos no ambiente construído.

Nos municípios avaliados, conforme apresentado na seção 5.3.2, as áreas urbanizadas, compostas pelas classes de Área Construída e Pavimentação, somam 19% dos CDPs. É predominante, entretanto, a área coberta por vegetação arbustiva, que se encontra preservada em 51% da área do território analisado. Os corpos d'água cobrem apenas 1% da área total.

O solo exposto e a vegetação rasteira totalizam 29% dos CDPs dos municípios aqui analisados. Essas áreas representam, justamente, aqueles espaços com potencial para o desenvolvimento da agricultura urbana. Considerando os diversos benefícios que proporciona à cidade, a área arborizada deverá ser preservada, sempre que possível. Considera-se, também, como pouco provável a possibilidade de converter a área construída e pavimentada em hortas urbanas. Desta maneira, as áreas de **vegetação rasteira** e de **solo exposto** foram consideradas como áreas aptas para a produção de alimentos, o que resulta em uma área 1991,30 ha.

De acordo com o estudo realizado por Souza (2009), para suprir a demanda da população do município de Feliz, em termos de frutas, vegetais e grãos, requer-se-ia uma área de 0,01 ha/hab. Considerando essa estimativa e extrapolando-a para os demais municípios avaliados, seria necessária uma área de 959,97 ha para atender à necessidade dessas comunidades por tais alimentos. Desta forma, seria possível atender à demanda da população dos municípios analisados, em termos de frutas, vegetais e grãos, com o cultivo de apenas 48,2% das áreas consideradas disponíveis.

Na Tabela 13, são apresentadas as áreas de cultivo de alimentos, com origem na horticultura, necessárias para suprir à demanda estimada, em cada município. Observa-se que, em termos de suprimento de tais alimentos, as áreas de vegetação rasteira ou solo exposto, inseridas nos CDPs, seriam suficientes para o atendimento às necessidades locais, de cada um dos municípios, com exceção do município de Montenegro. O déficit de áreas disponíveis para a produção urbana de tais alimentos deste município poderia ser, todavia, facilmente suprido pela sua produção na área agrícola do município, ou mesmo, pela produção excedente de municípios vizinhos.

Tabela 13 – Área demandada para o cultivo de alimentos com origem na horticultura, para atender à necessidade das populações dos municípios sendo referidos.

Município	Área de Cultivo Necessária (ha)	Parcela da área disponível (%)
Feliz	136,4	60%
Maratá	27,02	6%
Montenegro	657,21	140%
Alto Feliz	30,36	15%
Harmonia	49,17	42%
Vale Real	59,81	12%
<i>TOTAL</i>	<i>959,97</i>	<i>48%</i>

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Cabe esclarecer, contudo, que não se está sugerindo que todos esses espaços sejam convertidos em hortas urbanas. O objetivo principal da presente análise é a identificação, localização e quantificação de áreas potencialmente disponíveis. Embora ressaltamos, aqui, o potencial das áreas de vegetação rasteira e de solo exposto para a constituição de espaços para produção hortícola urbana, é importante considerar que áreas já construídas também poderão contribuir

de forma significativa na composição da paisagem produtiva. Um exemplo, é a anexação de estruturas, tais como telhados ou paredes verdes, aos espaços já construídos, assim ampliando a área verde total disponível.

A redução das distâncias entre as zonas de produção e de consumo, bem como uma produção diversificada de alimentos e em menores áreas, constituem aspectos de fundamental importância para o redirecionamento dos sistemas alimentares à sustentabilidade (GLIESSMAN, 2015). O aproveitamento de espaços dentro da cidade, passíveis de produção de alimentos, contribuirá para a redução das distâncias produtor-consumidor, fazendo com que os alimentos se tornem mais facilmente acessíveis, visto que tais distâncias poderão ser percorridas a pé, ou mesmo de bicicleta. Tal premissa está, também, alinhada aos princípios do Urbanismo Sustentável, que, de acordo com Farr (2013), estimulam os deslocamentos a pé, na composição de uma infraestrutura urbana de alto desempenho. Também, a biofilia, outra premissa central entre as propostas do autor, deve ser estimulada, com a implantação de espaços de produção de alimentos dentro na malha urbana, mesmo em meio às áreas de maior densidade. Na Figura 129, apresenta-se o **Indicador de População Atendida**, nas áreas com potencial para a implantação de hortas urbanas.

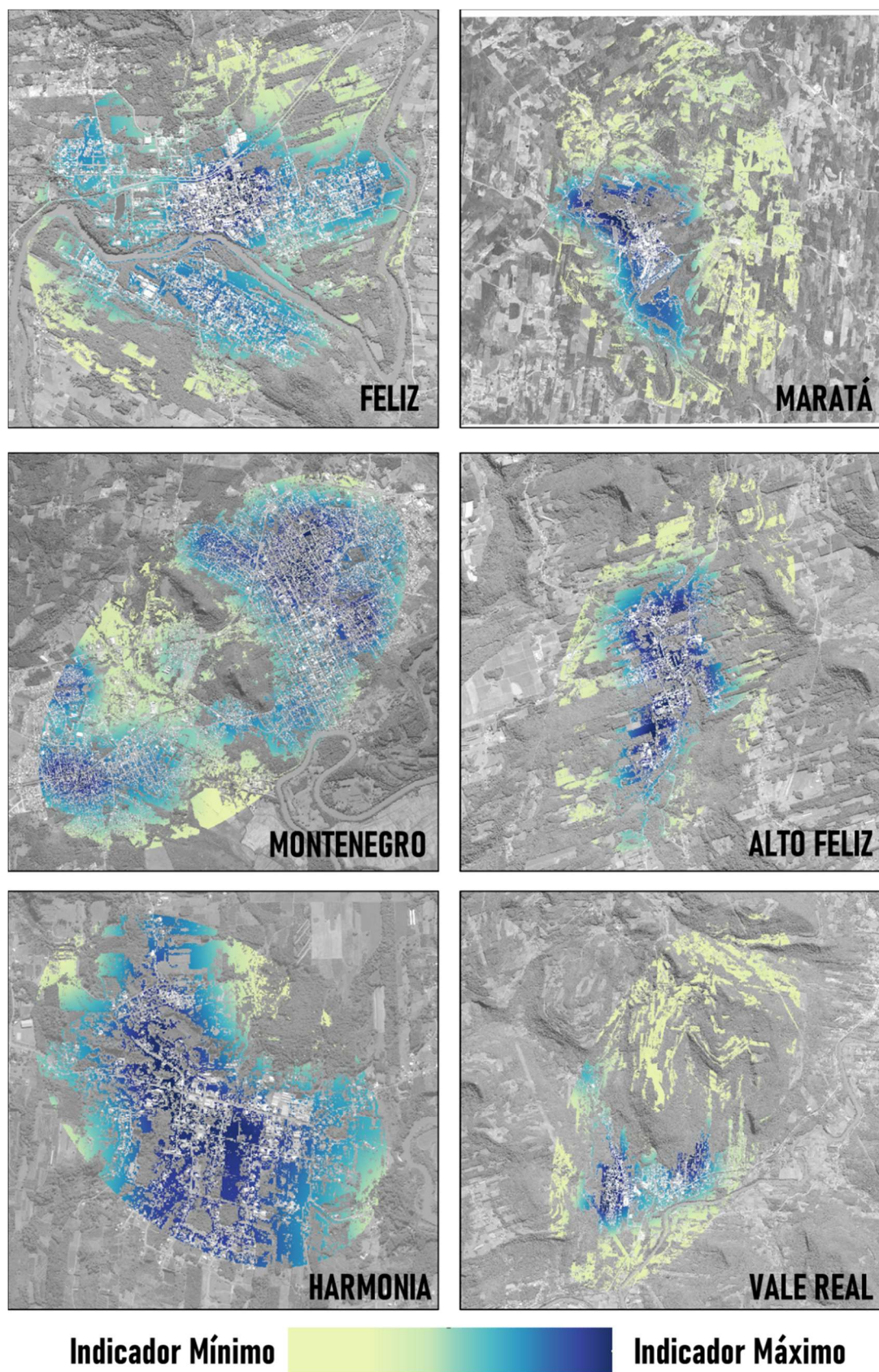


Figura 129: Indicador de População Atendida nas áreas com potencial para a implantação de hortas urbanas.
(Elaborada pela autora, 2022)

Os planos de implantação desses espaços devem levar em consideração, além das características demográficas, os aspectos sociais da comunidade local. A produção urbana de alimentos pode promover o combate a inequidades, auxiliando na garantia da segurança alimentar e no acesso a uma nutritiva dieta, para populações em situação de maior vulnerabilidade. Na Figura 130, é apresentado o **Indicador de Inclusão/Exclusão Social (IEX)**, em áreas apropriadas para a implantação de hortas urbanas. Esse mapeamento tem o potencial de orientar a respeito dos espaços disponíveis, e que podem atender, de maneira mais efetiva, às populações em situação de exclusão mais acentuada.

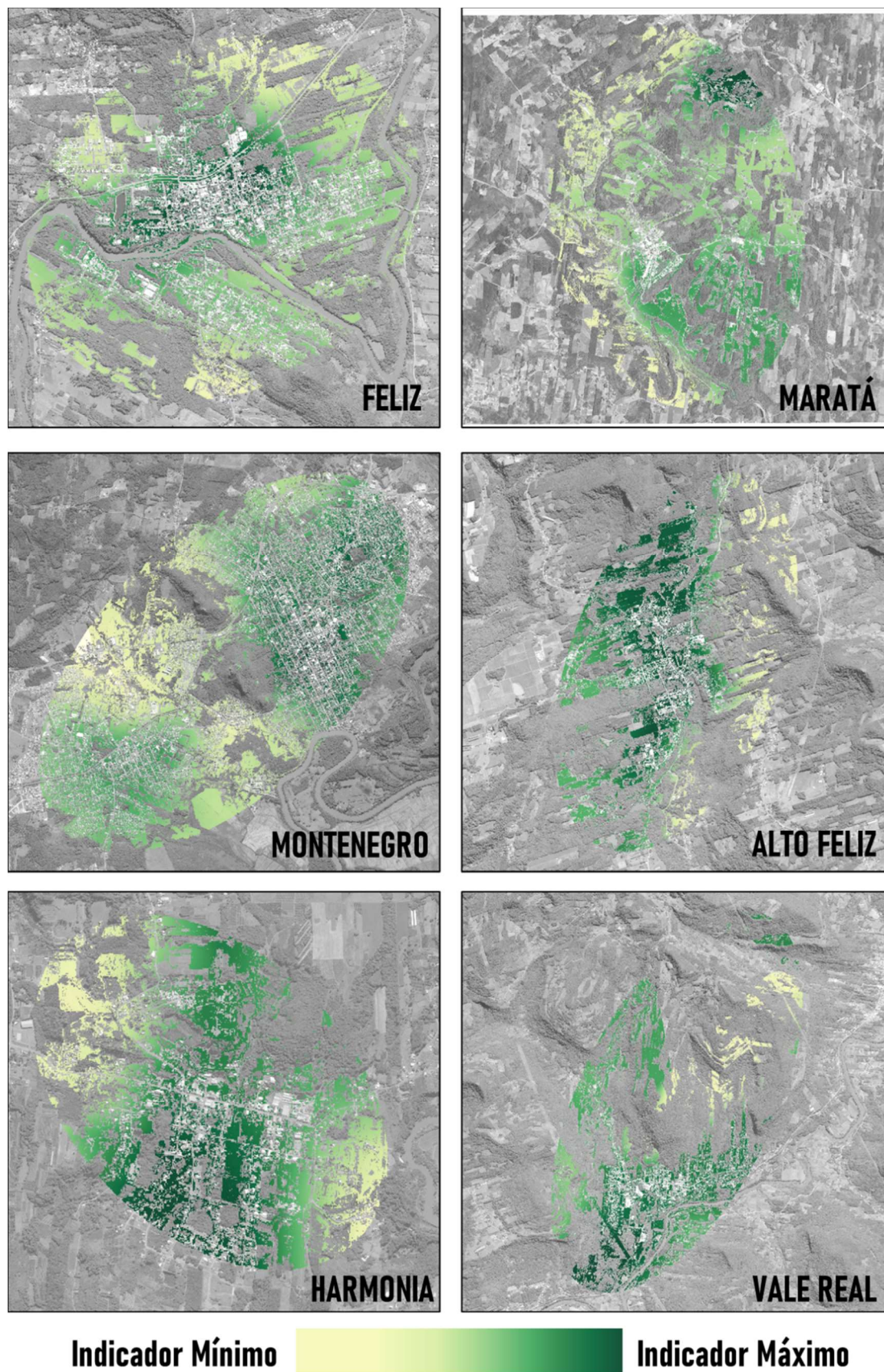


Figura 130: Indicador de Inclusão/Exclusão Social (IEX), em áreas com potencial para a implantação de hortas urbanas. (Elaborada pela autora, 2022)

A identificação das áreas mais adequadas ao propósito das áreas verdes a serem implantadas poderá ser facilitada pela consideração da morfologia e da conectividade desses. Conforme destaca Farr (2013), os parques e corredores verdes necessitam de espaços maiores e contínuos; já, as áreas verdes comunitárias, as quais podem estar associadas à produção de alimentos, requerem espaços menores, mas suficientes para que o usuário possa se afastar da movimentação das ruas. Também a produção de caráter individual, fazendo uso de coberturas verdes, e podendo incluir hortas e pomares caseiros, pode ser considerada como mais uma alternativa, possibilitando o uso de espaços mais fragmentados e inseridos em lotes privados. Na Figura 131, é apresentado o mapeamento do **Indicador de Continuidade**, em áreas passíveis de implantação de hortas urbanas.

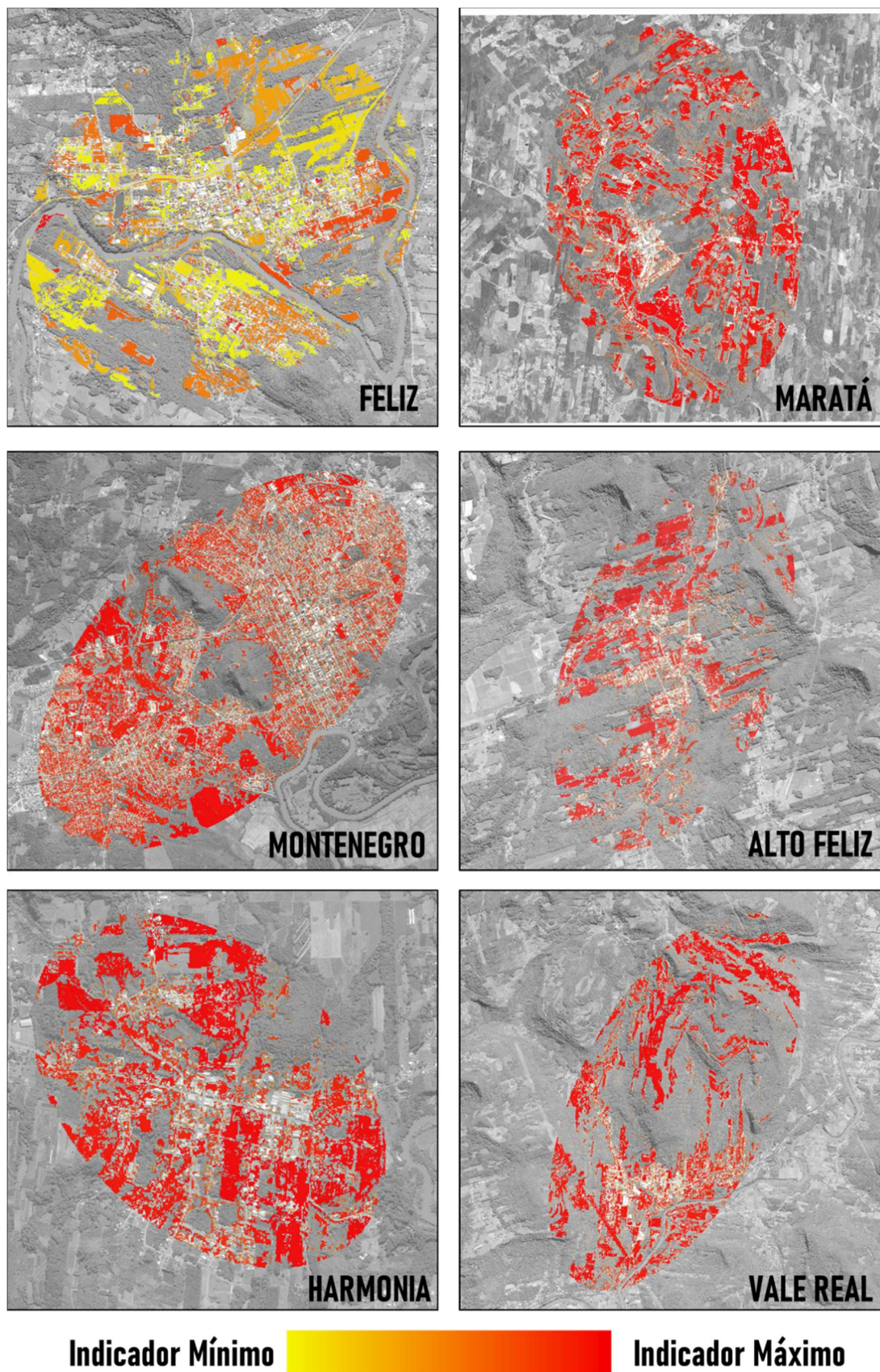
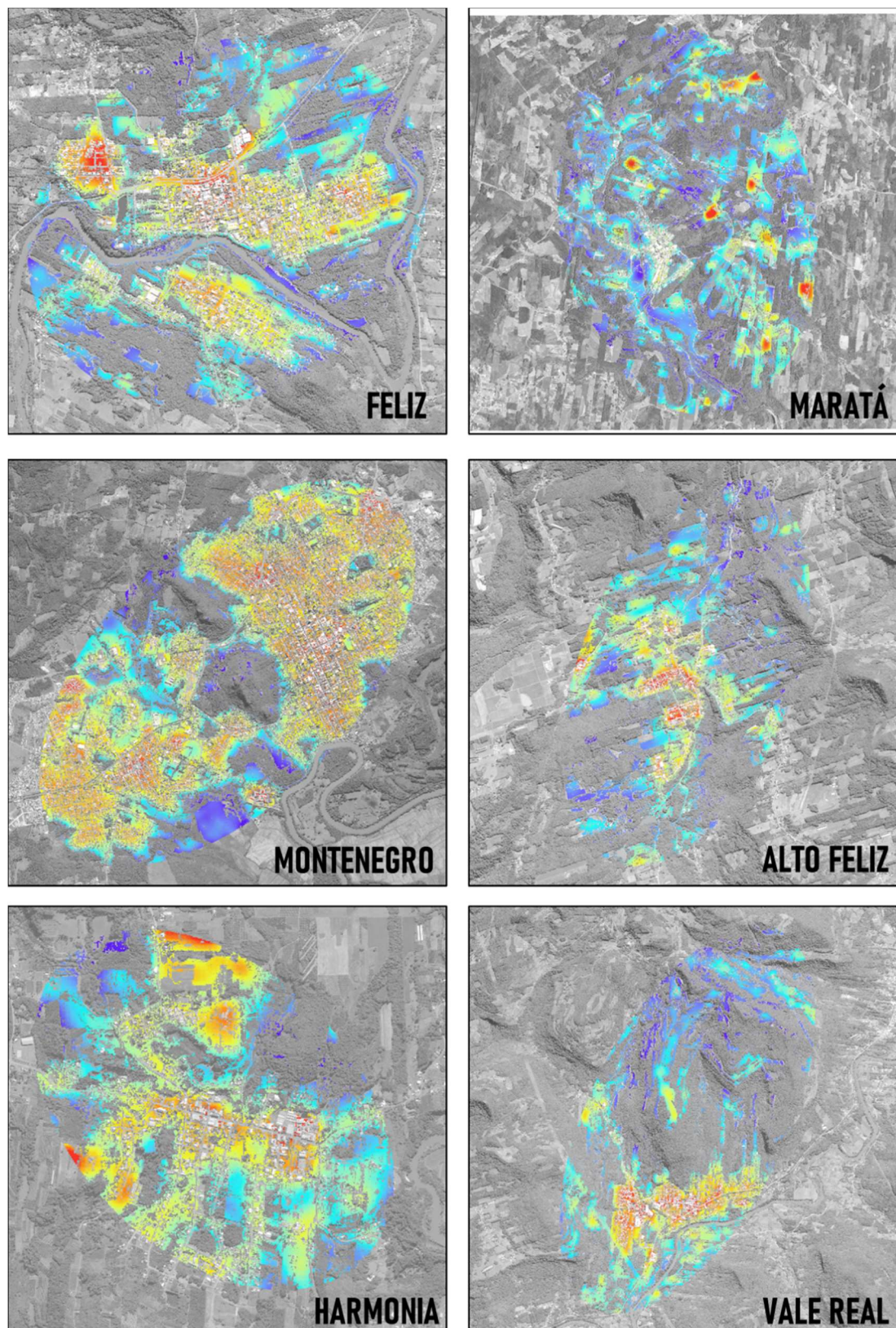


Figura 131: Indicador de Continuidade em áreas passíveis de implantação de hortas urbanas.
(Elaborada pela autora, 2022)

Outro aspecto que merece destaque diz respeito à mitigação dos efeitos de ilhas de calor urbanas, que poderiam ser proporcionados pela preservação e acréscimo de áreas verdes nas zonas urbanas, conforme evidenciado na seção 5.3.3. Além dos benefícios já destacados, a presença de espaços verdes na malha urbana, poderá contribuir para a melhoria do microclima urbano. De acordo com Gliessman (2015), o microclima é caracterizado pelas condições localizadas de temperatura, umidade e atmosfera, no ambiente imediato de um ambiente específico, de pequena escala. Por meio de um projeto e gerenciamento adequados, o microclima de um sistema poderá contribuir para a criação de condições favoráveis ao estabelecimento e manutenção de um sistema agrícola produtivo. Embora o principal objetivo destas práticas seja a obtenção de temperaturas adequadas aos propósitos perseguidos, elas também impactam outros fatores microclimáticos, como a umidade e a luz.

Quando inseridos no ambiente construído, esses espaços voltados para a produção de alimentos podem auxiliar no abrandamento das temperaturas superficiais, amenizando, ou mesmo evitando, a formação do fenômeno de ilhas de calor urbana. A criação e consolidação desses espaços de uso e ocupação do solo, ainda em estágios iniciais do processo de urbanização de pequenas municipalidades, poderão contribuir, por meio da criação de uma paisagem multifuncional, para avanços em direção à sustentabilidade. Na Figura 132, apresenta-se um **Indicador de Temperatura de Superfície**, em áreas para a implantação de hortas urbanas, no conjunto dos municípios sendo analisados.



Indicador Mínimo  **Indicador Máximo**

Figura 132: Indicador de Temperatura de Superfície, em áreas passíveis de implantação de hortas urbanas. (Elaborada pela autora, 2022)

Esses indicadores poderão constituir valiosas referências para orientar planos estratégicos setoriais voltados, tanto à segurança alimentar, como ao paisagismo produtivo. É possível direcionar atenções e investimentos para: atender a um maior número de habitantes (população atendida); reduzir inequidades, por meio da produção urbana de alimentos (Índice de Inclusão/Exclusão Social); avaliar as áreas com maior potencial de constituírem corredores verdes, devido à sua morfologia e conectividade (conectividade); ou, até mesmo, mitigar os efeitos das ilhas de calor urbanas (abrandamento da temperatura superficial).

É importante ser destacado que a avaliação de cada indicador, quando analisada de forma isolada, não considera a necessidade de tratamento das questões urbanas como problemas complexos, constituindo subconjuntos que se sobrepõem e se interceptam. Neste sentido, a técnica de aprendizado de máquinas, *k-means*, foi utilizada como suporte para mapear grupos que contemplem, simultaneamente, as variáveis avaliadas.

A análise dos resultados possibilitou a identificação, tanto de padrões comuns a vários dos municípios, quanto de particularidades específicas a cada um deles. Sob este aspecto, se observou que os municípios de **Alto Feliz, Montenegro e Harmonia** apresentaram um padrão semelhante, como ilustrado na Figura 133.

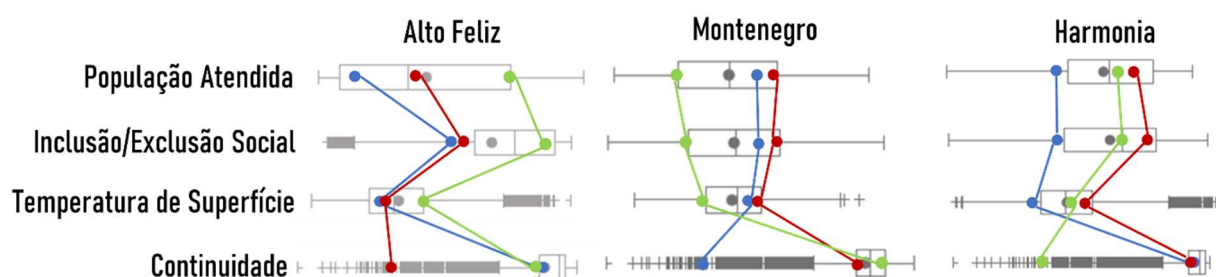


Figura 133: Caracterização por grupos, segundo valores médios das variáveis, dos municípios de Alto Feliz, Montenegro e Harmonia. (Elaborada pela autora, 2022)

Os referidos municípios têm, em comum, a característica de apresentarem, no primeiro grupo, valores mais baixos nos indicadores de: população atendida; inclusão/exclusão social; e temperaturas superficiais. A continuidade das áreas disponíveis nesse grupo, por sua vez, são as maiores observadas nos espaços disponíveis no CDP de cada município.

Um segundo grupo de espaços disponíveis, no CDP dos referidos municípios, é caracterizado por valores mais próximos à média local, para as variáveis de: população atendida; inclusão/exclusão social; e temperaturas superficiais. A continuidade das áreas disponíveis associadas a esse grupo, entretanto, são as menores observadas nos municípios, indicando uma maior fragmentação.

Por fim, o terceiro grupo é caracterizado pelos maiores valores de: população atendida; inclusão/exclusão social; e temperaturas superficiais. Já, as áreas de continuidade são ligeiramente inferiores às do primeiro grupo, porém apresentando-se pouco fragmentadas.

A espacialização da análise multivariada, no município de Alto Feliz, é apresentada na Figura 134, na qual é possível observar uma predominância dos grupos 1 e 3, em termos de área. O grupo 2, embora pouco expressivo, em termos de área total, pode apresentar uma relevante contribuição, em termos de um melhor aproveitamento dos espaços intraurbanos.

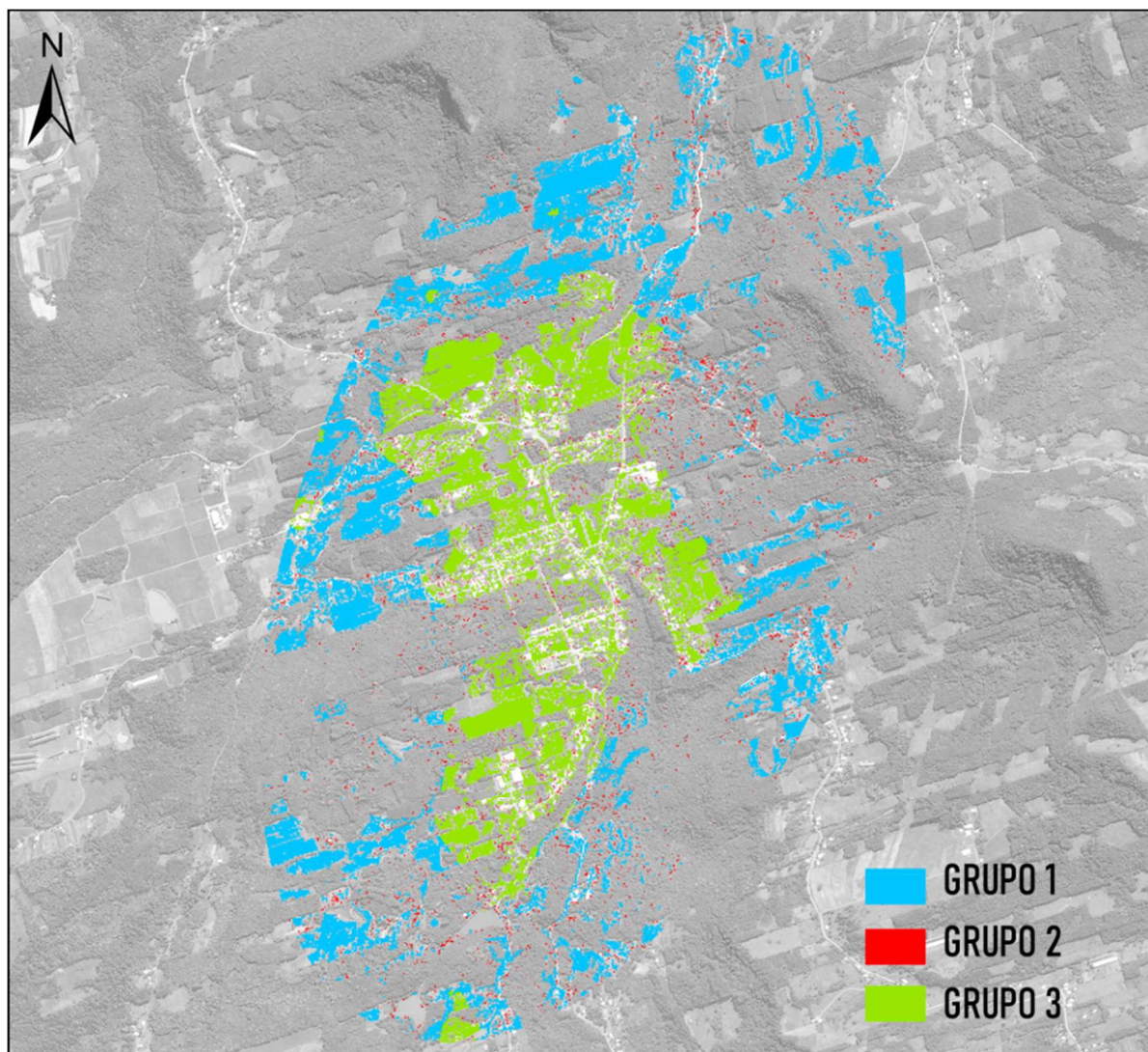
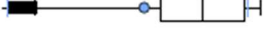



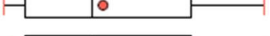
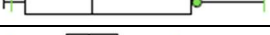





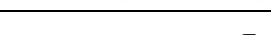


Figura 134: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Alto Feliz.

(Elaborada pela autora, 2022)

Na Tabela 14, são apresentados os principais resultados da análise multivariada no município. Observa-se que as variáveis de população atendida ($R^2 = 0,71$) e continuidade de área ($R^2 = 0,62$) apresentam uma maior contribuição para a distinção entre os grupos.

Tabela 14 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Alto Feliz.

Indicador	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Inclusão e Exclusão Social $R^2 = 0,28$	1		0,16	0,44	0,32
	2		0,16	0,45	0,33
	3		0,29	0,45	0,42
População Atendida (hab) $R^2 = 0,71$	1		10,73	108,75	34,07
	2		10,73	153,95	65,58
	3		15,66	154,15	117,15
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,26$	1		23,72	31,95	27,08
	2		23,70	34,44	27,15
	3		25,39	35,97	28,97
Continuidade da Área $R^2 = 0,62$	1		0,61	0,94	0,86
	2		0,00	0,66	0,41
	3		0,43	0,93	0,85

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Na Figura 135, observa-se o mapeamento por grupos, identificados por meio da análise multivariada, no município de Montenegro.

O grupo 1, abrangendo áreas de maior fragmentação, apresenta a menor área total. Apesar de apresentar uma área reduzida, a identificação desses espaços pode ser importante para fins de seu aproveitamento como áreas urbanas destinadas à produção de alimentos.

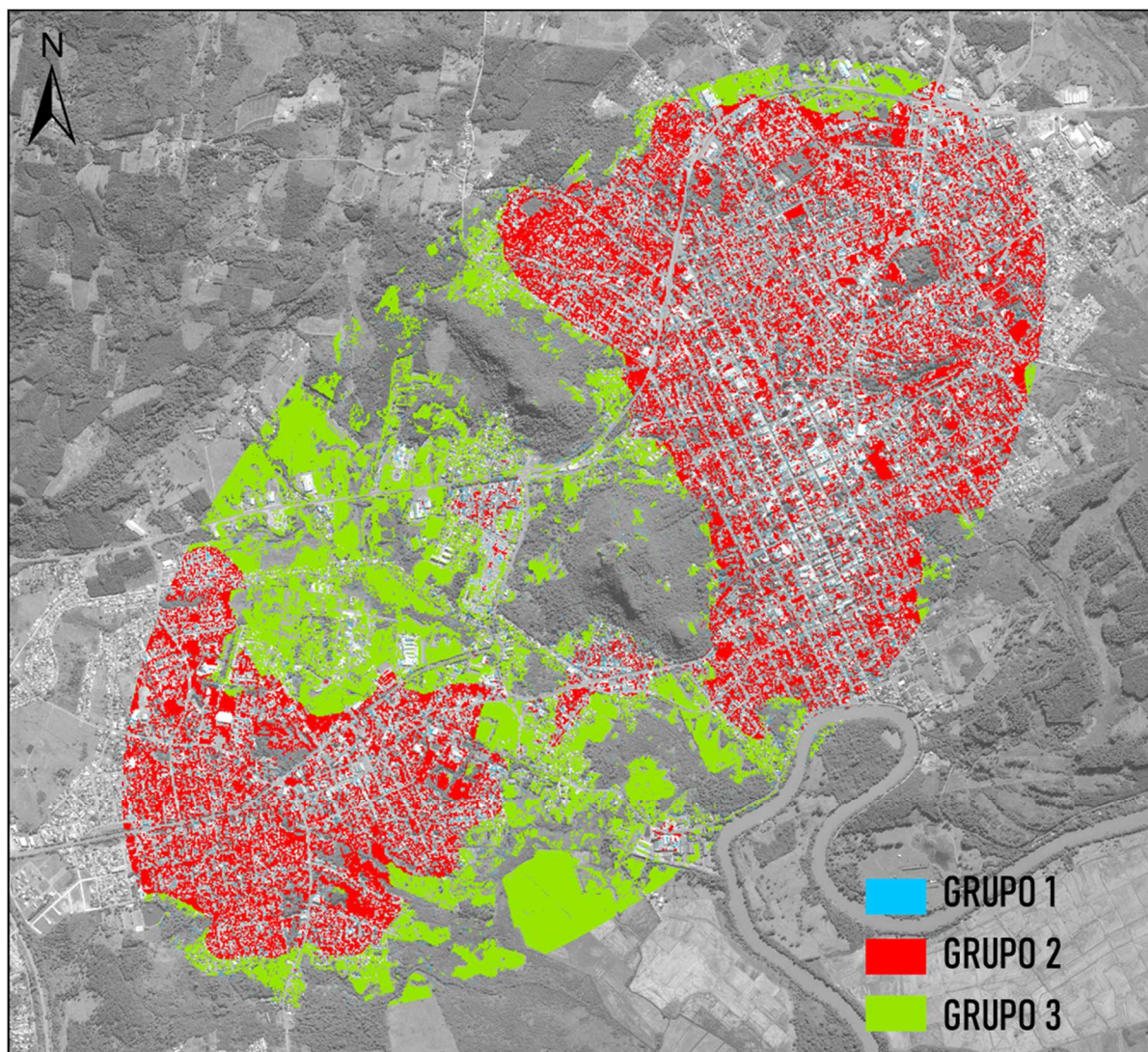


Figura 135: Análise por grupos de: população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Montenegro/RS.
(Elaborada pela autora, 2022)

Conforme exposto na Tabela 15, todas as variáveis constituem elementos distintivos entre os grupos, merecendo especial destaque a métrica de continuidade de área ($R^2 = 0,65$).

Tabela 15 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Montenegro.

Indicador	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Inclusão e Exclusão Social $R^2 = 0,49$	1		-0,07	0,80	0,41
	2		-0,05	0,80	0,46
	3		-0,07	0,62	0,17
População Atendida (hab) $R^2 = 0,57$	1		99,68	2532,02	1366,76
	2		266,44	2534,19	1612,12
	3		99,17	1859,79	713,80
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,51$	1		28,01	45,76	36,81
	2		30,65	44,25	37,58
	3		28,00	41,02	33,49
Continuidade da Área $R^2 = 0,65$	1		0,00	0,59	0,32
	2		0,53	0,92	0,80
	3		0,47	0,97	0,88

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Apresenta-se, na Figura 136, o mapeamento resultante da análise multivariada, para o município de Harmonia. Pode-se observar, em termos de área ocupada, a predominância dos espaços classificados como integrantes dos grupos 1 e 2.

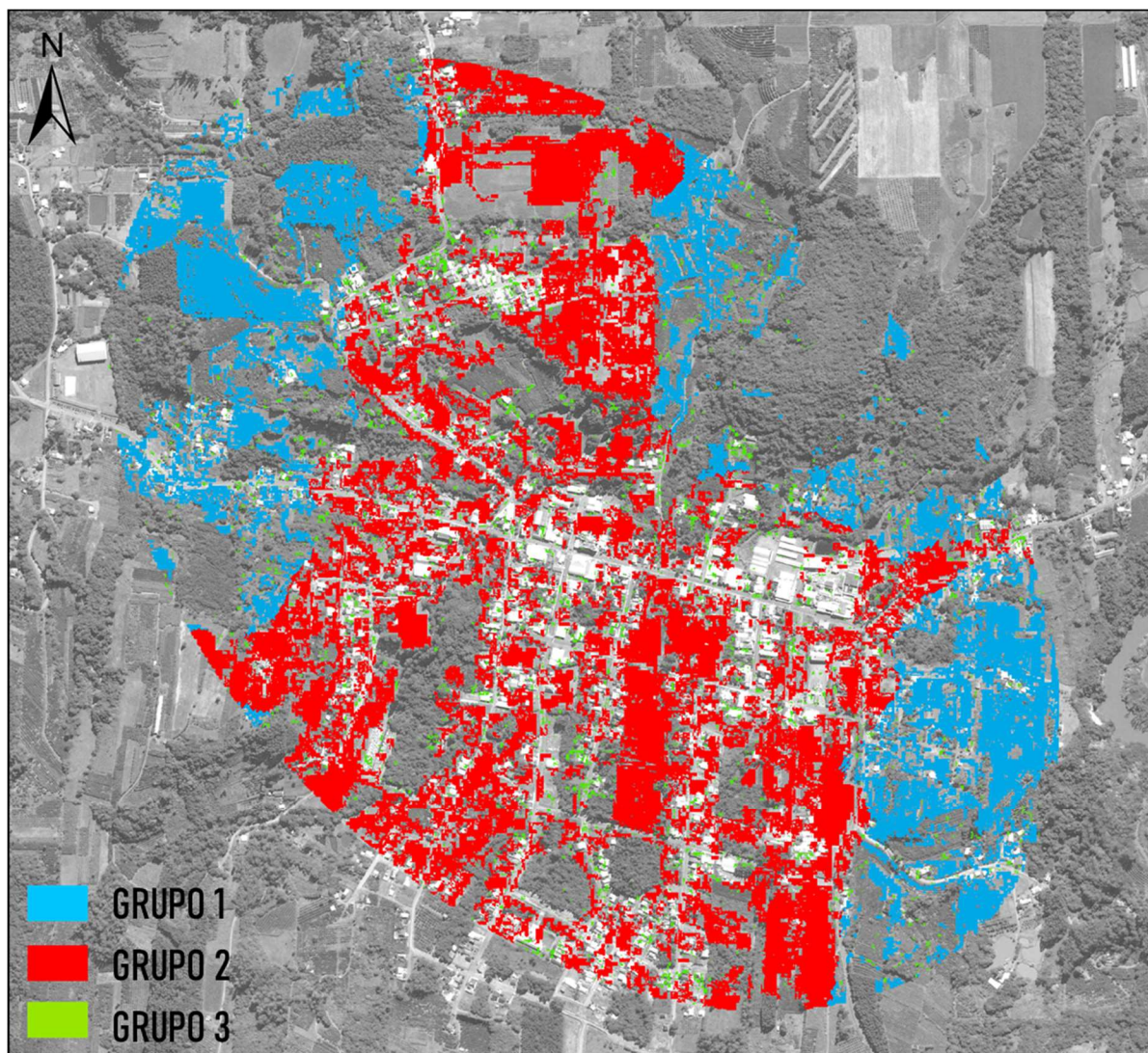


Figura 136: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Harmonia.

(Elaborada pela autora, 2022)

Na Tabela 16, observa-se que a variável que melhor diferencia os grupos é a continuidade da área disponível ($R^2 = 0,62$), seguida pelo indicador de inclusão/exclusão social ($R^2 = 0,52$).

Tabela 16 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Harmonia.

Indicador	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Inclusão e Exclusão Social $R^2 = 0,52$	1		0,23	0,48	0,34
	2		0,32	0,55	0,47
	3		0,23	0,55	0,44
População Atendida (hab) $R^2 = 0,39$	1		19,07	318,80	170,31
	2		66,91	367,80	277,11
	3		19,07	365,36	262,93
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,38$	1		28,60	36,86	32,29
	2		30,43	41,07	34,66
	3		28,34	41,46	33,91
Continuidade da Área $R^2 = 0,62$	1		0,50	0,91	0,86
	2		0,61	0,91	0,86
	3		0,00	0,66	0,44

Fonte: elaborada pela autora, 2022

O município de **Maratá** apresentou um padrão diferenciado, em sua caracterização por grupos, resultante da análise multivariada, como ilustrado pela Figura 137. Observa-se que o grupo 1 pode ser identificado como apresentando espaços com valores próximos à média, para todas as variáveis. No tocante ao grupo 2, identifica-se uma maior população atendida, associada a valores também próximos à média, para as demais variáveis. O grupo 3 é caracterizado, principalmente, pela maior fragmentação de áreas, associada a temperaturas de superfície e condições de inclusão/exclusão social ligeiramente menores do que as observadas nos demais grupos.

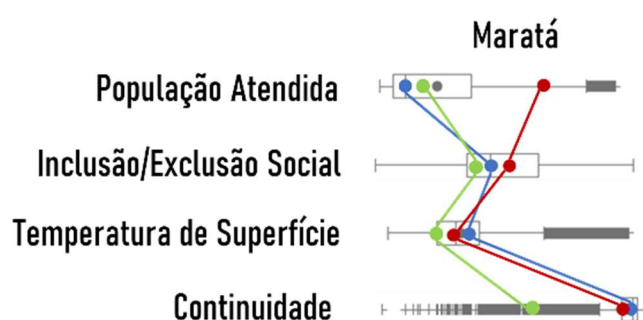


Figura 137: Caracterização por grupos, segundo valores médios das variáveis, no município de Maratá.
(Elaborada pela autora, 2022)

A espacialização da análise multivariada, no município de Maratá, é apresentada na Figura 138.

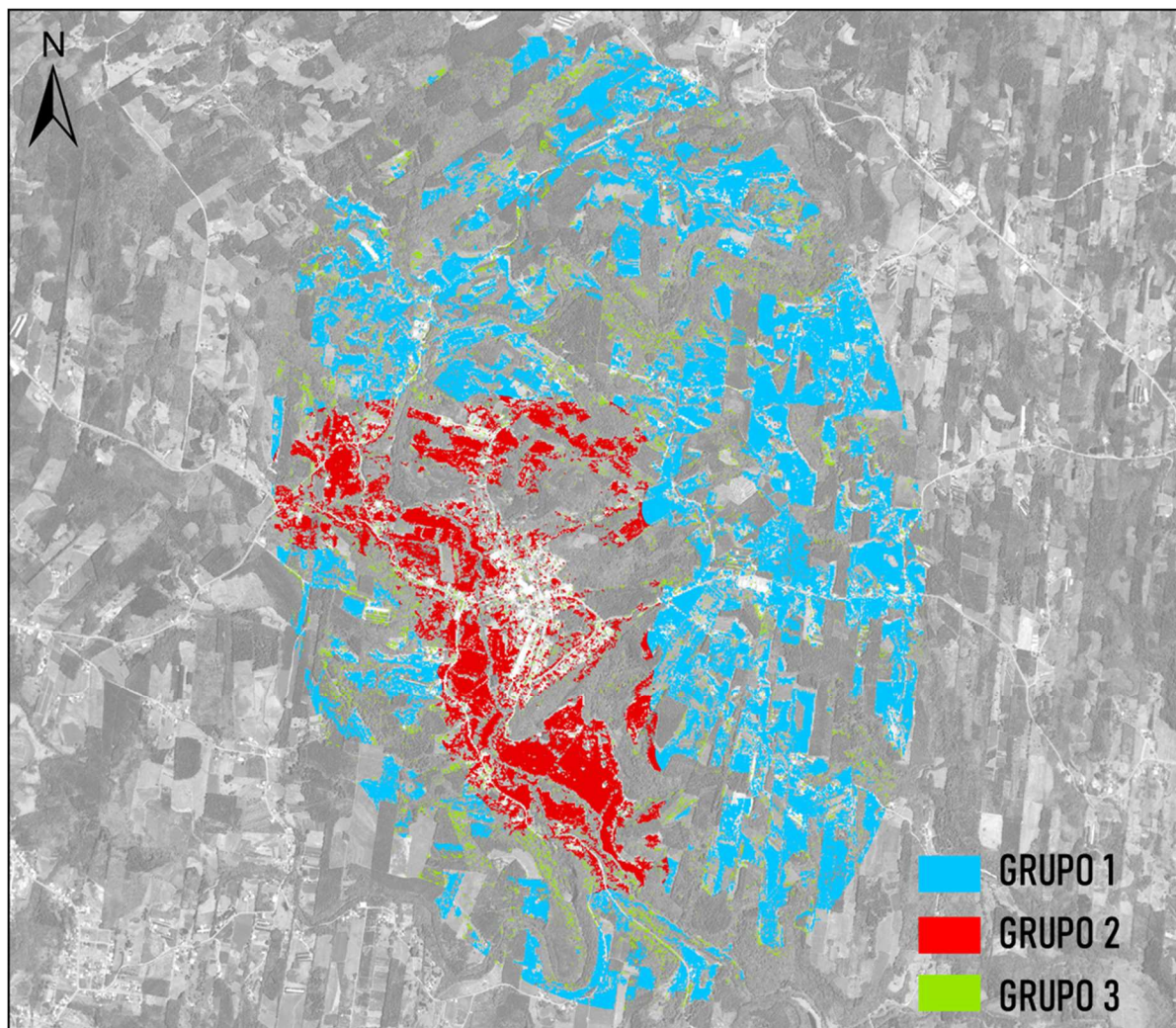


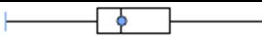
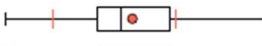




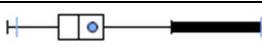





Figura 138: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Maratá.

(Elaborada pela autora, 2022)

Alguns valores característicos dos grupos resultantes deste tipo de análise multivariada são apresentados, adicionalmente, na Tabela 17. No município de Maratá, as variáveis que melhor discriminam os grupos são as de população atendida e de continuidade da área disponível ($R^2 = 0,78$ e $R^2 = 0,63$). Apenas neste município, duas das variáveis da análise multivariada se mostraram pouco significativas em distinguir os grupos. Embora seja possível caracterizar os grupos, de acordo com a média das variáveis, a temperatura superficial e as condições de

inclusão/exclusão social são melhor avaliadas quando consideradas isoladamente. Cabe ressaltar, todavia, que a limitação identificada não invalida o método aplicado, mas reforça a necessidade de se aprofundar a interpretação dos resultados, com a consideração das particularidades específicas a cada local. Tais particularidades poderiam ser identificadas por meio de uma análise exploratória multivariada, incluindo outro conjunto de variáveis, não abordadas no presente trabalho, mas que podem ser relevantes para a caracterização de grupos, para fins de planejamento local.

Tabela 17 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Maratá.

Indicador	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Inclusão e Exclusão Social $R^2 = 0,01$	1		0,00	0,74	0,33
	2		0,14	0,49	0,36
	3		0,00	0,74	0,30
População Atendida (hab) $R^2 = 0,78$	1		6,22	64,15	17,44
	2		35,84	123,32	83,10
	3		6,22	123,32	29,44
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,09$	1		27,93	42,87	32,59
	2		27,75	38,68	31,49
	3		27,40	41,42	30,50
Continuidade da Área $R^2 = 0,63$	1		0,60	0,94	0,89
	2		0,53	0,95	0,87
	3		0,00	0,78	0,54

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Observou-se um padrão semelhante, na caracterização dos grupos, nos municípios de **Vale Real e Feliz**, como ilustrado na Figura 139. Em ambos os municípios, identifica-se um primeiro grupo, caracterizado por valores reduzidos das variáveis: população atendida; inclusão/exclusão social; e temperaturas superficiais. A continuidade das áreas disponíveis neste grupo, por sua vez, é intermediária. O segundo grupo é caracterizado por valores intermediários, nas três primeiras variáveis. O grupo, entretanto, é constituído pelas áreas de maior continuidade. O terceiro grupo, por sua vez, é caracterizado pelos maiores valores no conjunto das três variáveis acima identificadas, assim como contendo as áreas de maior fragmentação espacial.

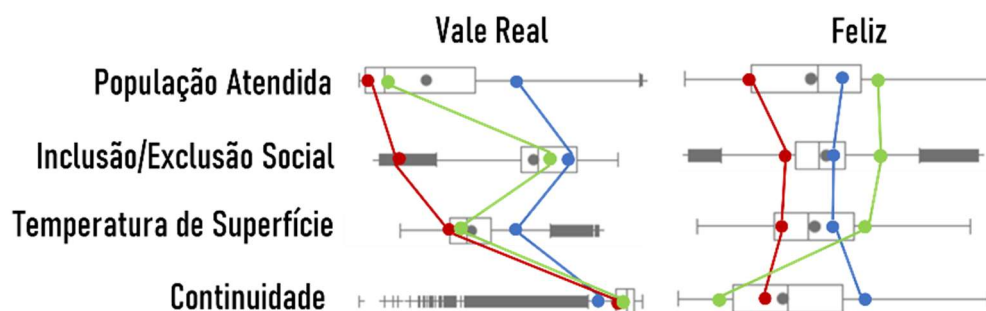


Figura 139: Caracterização por grupos, segundo valores médios das variáveis, nos municípios de Vale Real e Feliz (Elaborada pela autora, 2022)

Na Figura 140, apresenta-se o mapeamento resultante da análise multivariada, para o município de Vale Real.

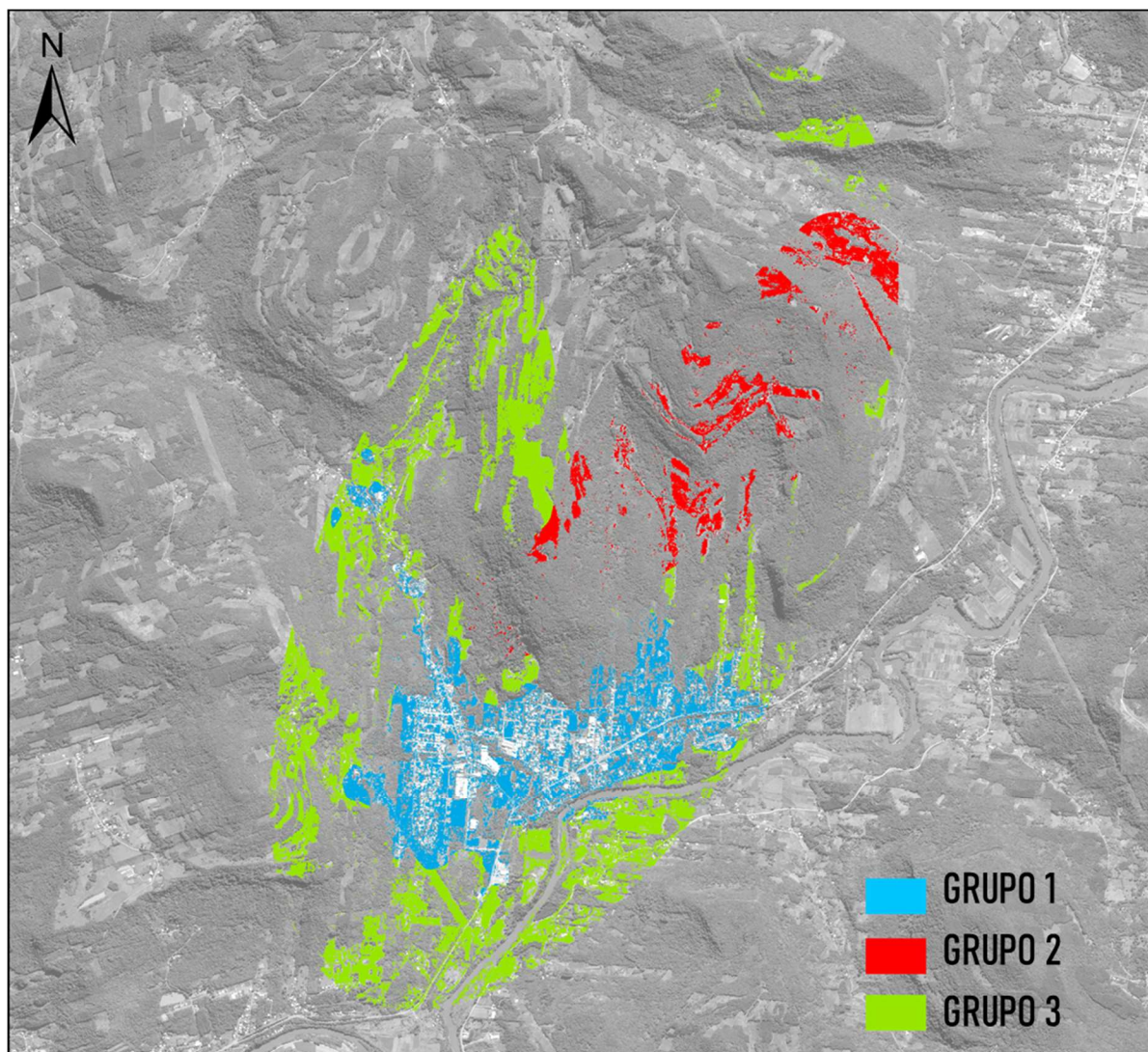


Figura 140: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Vale Real.

(Elaborada pela autora, 2022)

Na Tabela 18, observa-se que o Indicador de Inclusão/Exclusão Social identifica a variável que melhor diferencia os grupos ($R^2 = 0,77$), seguido pelo Indicador de População Atendida ($R^2 = 0,70$) e pelo de Temperatura Superficial ($R^2=0,52$). Particularmente, no município de Vale Real, a continuidade de áreas não representa um elemento relevante de distinção entre os grupos ($R^2=0,04$). Embora não seja significativa, por si só, para a caracterização dos grupos em análise, não sendo indicada para, dessa maneira, ser a condutora exclusiva da análise proposta, a variável de continuidade das áreas pode, tanto fornecer uma informação complementar importante para a tomada de decisão, quanto constituir um importante elemento de análise, quando empregada em conjunto com as outras variáveis.

Tabela 18 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Vale Real.

Indicador	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Inclusão e Exclusão Social $R^2 = 0,77$	1		-0,15	0,64	0,40
	2		-0,62	-0,02	-0,53
	3		-0,19	0,64	0,27
População Atendida (hab) $R^2 = 0,70$	1		9,62	469,21	285,75
	2		4,39	201,27	14,29
	3		8,53	324,77	57,95
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,52$	1		25,25	40,17	32,68
	2		24,24	33,04	27,96
	3		23,88	33,90	28,73
Continuidade da Área $R^2 = 0,04$	1		0,00	0,92	0,81
	2		0,00	0,93	0,86
	3		0,00	0,93	0,86

Fonte: elaborada pela autora, 2022

Na Figura 141, observa-se a espacialização da análise multivariada no município de Feliz.

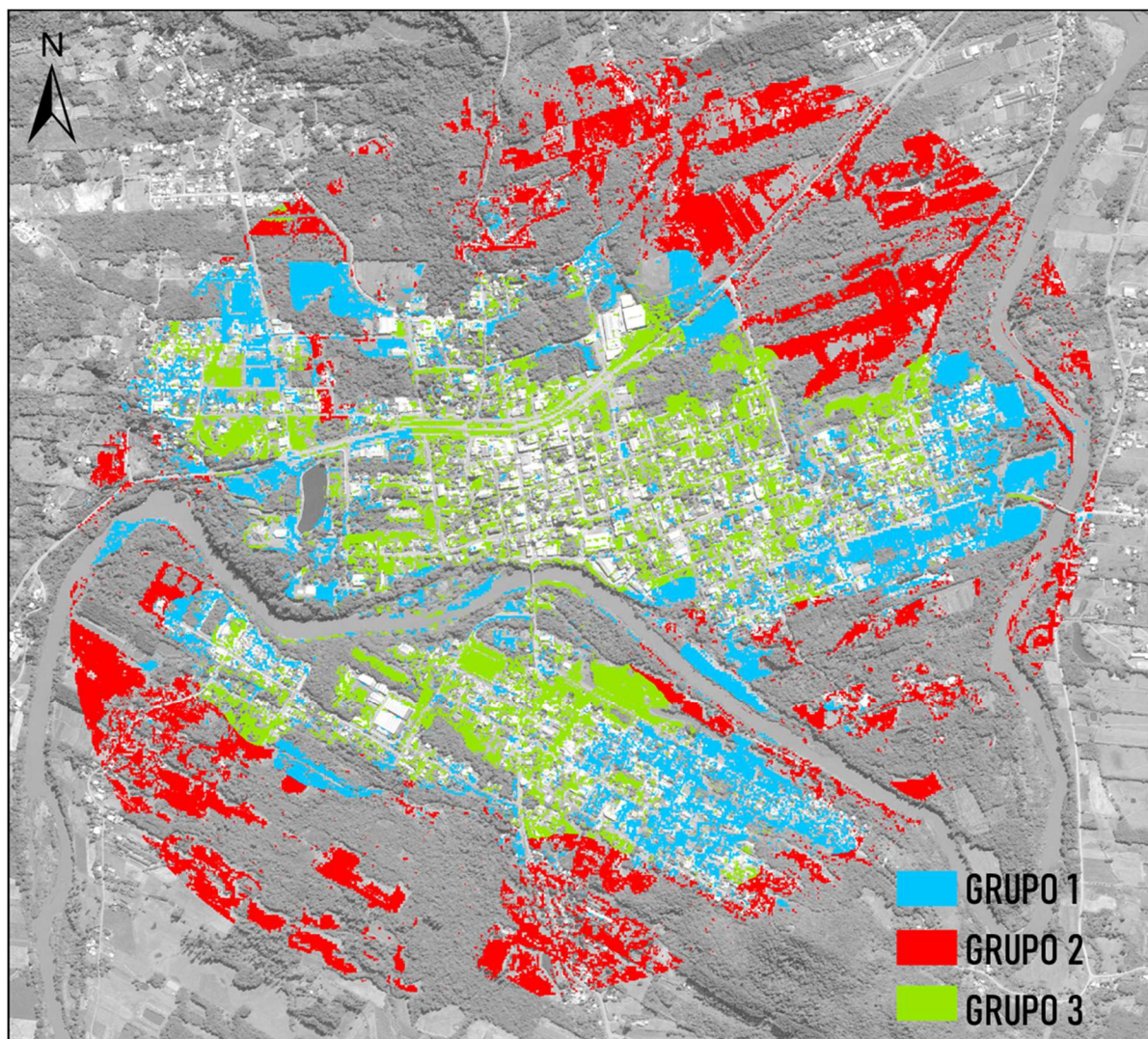


Figura 141: Análise por grupos, em termos: de população atendida; condição de inclusão/exclusão social; área contínua e temperatura superficial; para fins de produção urbana de alimentos, no município de Feliz.

(Elaborada pela autora, 2022)

Na Tabela 19, observa-se que as variáveis de população atendida ($R^2 = 0,65$) e de continuidade de área ($R^2 = 0,52$) são as que oferecem a contribuição mais significativa para a distinção entre os grupos.

Tabela 19 – Análise de dados, por variável, do CDP, no município de Feliz.

Indicador	Padrão	Resumo Estatístico	Mínimo	Máximo	Médio
Inclusão e Exclusão Social $R^2 = 0,45$	1		0,26	0,75	0,45
	2		0,14	0,57	0,35
	3		0,31	0,75	0,53
População Atendida (hab) $R^2 = 0,65$	1		105,69	864,28	445,70
	2		15,24	530,95	200,98
	3		267,63	863,86	530,53
Temperatura Superficial (°C) $R^2 = 0,45$	1		27,71	39,69	33,55
	2		27,08	34,99	31,04
	3		28,38	40,37	34,90
Continuidade da Área $R^2 = 0,52$	1		0,22	0,94	0,57
	2		0,00	0,94	0,27
	3		0,00	0,80	0,13

Fonte: elaborada pela autora, 2022

A compreensão da natureza complexa e interdisciplinar do sistema que provê alimentos aos centros urbanos é de fundamental importância para orientar uma comunidade em direção à sustentabilidade. Os resultados apresentados podem oferecer uma grande contribuição para a identificação de áreas disponíveis para a produção urbana de alimentos, contribuindo, tanto para implementação de políticas de segurança alimentar, quanto para a implantação de corredores verdes, ou mesmo para o desenvolvimento de iniciativas de educação ambiental.

Tais resultados poderão orientar ações na escala intraurbana, facilitando a identificação de áreas com possibilidade de serem incluídas entre aquelas destinadas para a produção urbana de alimentos, seja de forma coletiva (espaços públicos) ou individual (jardins e quintais), seja em espaços públicos, ou privados, e, a depender de seu tamanho, situação fundiária e localização.

Nesse sentido, um detalhamento foi realizado para o município de Feliz, com base nos resultados obtidos. Na Figura 142, podem ser observadas amostras de áreas integrantes do Grupo 1, com potencial para a implantação de hortas urbanas. O grupo reúne as áreas com maior potencial de atendimento àquele segmento da população, cuja condição de inclusão/exclusão social é intermediária. Nesse grupo, estão localizadas as maiores áreas contínuas existentes na paisagem. Essas áreas são particularmente indicadas, para a implantação de corredores verdes.

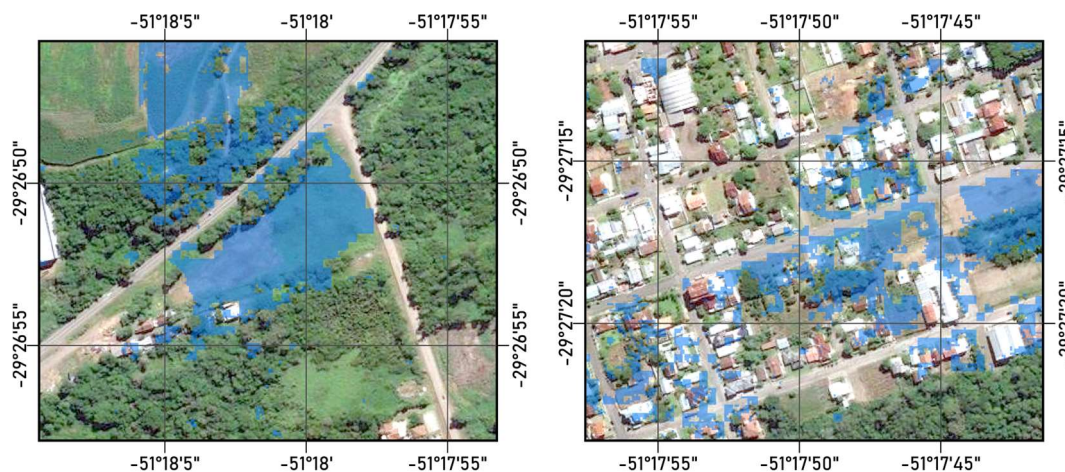


Figura 142: Amostras de áreas correspondentes ao Grupo 1, no município de Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

Em termos de população atendida, o Grupo 2 é constituído por áreas que, apesar de estarem localizadas próximas a famílias com condições de inclusão/exclusão social mais críticas, são identificadas como de menor expressividade, em termos de população atendida. Neste grupo podem ser identificadas, também, áreas de diversas dimensões, variando, em termos de continuidade, nas quais as temperaturas superficiais foram identificadas como sendo as menores. Pode-se, mesmo, afirmar que, em um projeto que vise assegurar a segurança alimentar, essas áreas podem ser consideradas como as mais indicadas à produção urbana de alimentos.

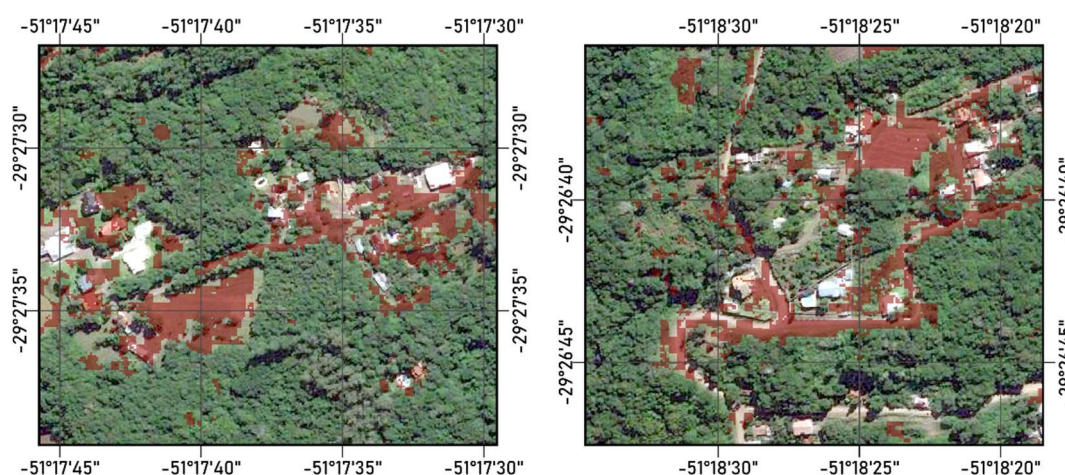


Figura 143: Amostras de áreas correspondentes ao Grupo 2, no município de Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

Na Figura 144, são apresentadas amostras de áreas integrantes do Grupo 3. Tais áreas são caracterizadas como detentoras dos maiores índices de atendimento à população, com as melhores condições de inclusão social. Nessas áreas também foram identificadas as maiores temperaturas superficiais. O grupo inclui, ainda, as menores áreas contínuas; ou seja, as áreas disponíveis são bastante fragmentadas. Essa característica deve ser considerada na formulação de planos voltados à produção urbana de alimentos. Para esses espaços são indicadas ações que contribuam para educação ambiental da população, que estimulem a produção urbana de alimentos, já que tais áreas identificam, não apenas os CDPs, mas também os centros de vivacidade do local e, com isso, oferecem um grande potencial de educação para um maior número de pessoas. Iniciativas nesse sentido, também não devem ser limitadas às grandes áreas contínuas, podendo ser implementadas, mesmo em pequenos espaços, desde que acessíveis à comunidade. A função da vegetação urbana no controle das temperaturas de superfícies, conforme abordado na seção 5.3.3, também pode ser destacada como um dos resultados alcançáveis por hortas urbanas implantadas nessas áreas.

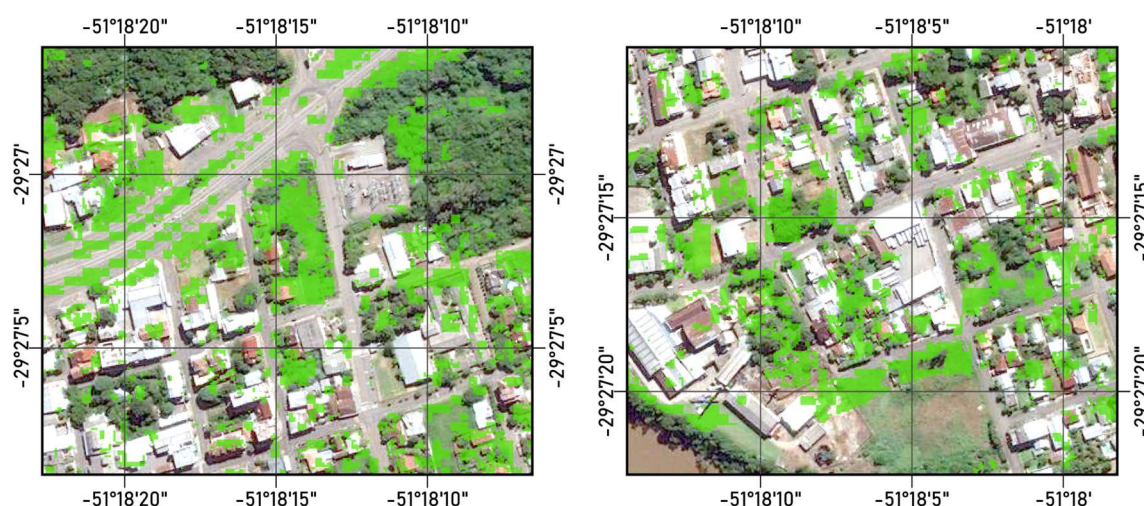


Figura 144: Amostras de áreas correspondentes ao Grupo 3, no município de Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

É importante destacar, entretanto, que a definição precisa das áreas destinadas à produção urbana de alimentos envolveria, além de um levantamento fundiário, uma análise do Plano Diretor da cidade. Com tal finalidade, foi realizada uma avaliação detalhada desses espaços no município de Feliz, de modo a exemplificar como os resultados de uma análise multivariada

podem ser considerados, em conjunto com definições importantes do Plano Diretor Participativo.

A primeira questão a ser destacada se relaciona à quantidade de espaços vazios presentes na área urbana do município. Esses espaços são de grande importância para que a gestão do espaço urbano seja desenvolvida de maneira eficiente, socialmente justa e ambientalmente equilibrada. Conforme destacam Damásio e Machado (2013), uma das principais questões a serem aprofundadas no município de Feliz é a relacionada, justamente, ao tema dos vazios urbanos.

O levantamento de terrenos vazios, localizados na Zona de Comércio e Serviços do município, identificou 56 lotes, com áreas que variam entre 0,0273 ha e 8,08 ha, totalizando uma área de 16,28 ha.

Estão apresentadas na Figura 145 as áreas consideradas como potencialmente aptas para a produção urbana de alimentos, e que estão inseridas nos vazios urbanos identificados no Plano Diretor Participativo. Tais espaços totalizam uma área de 6,68 ha, dos quais: 27% correspondem ao Grupo 1; 1%, ao Grupo 2; e 72%, ao Grupo 3. De acordo com Souza (2009), estima-se que o cultivo, tão somente dessas áreas, seria suficientes para atender a 5% da demanda local por produtos da horticultura.

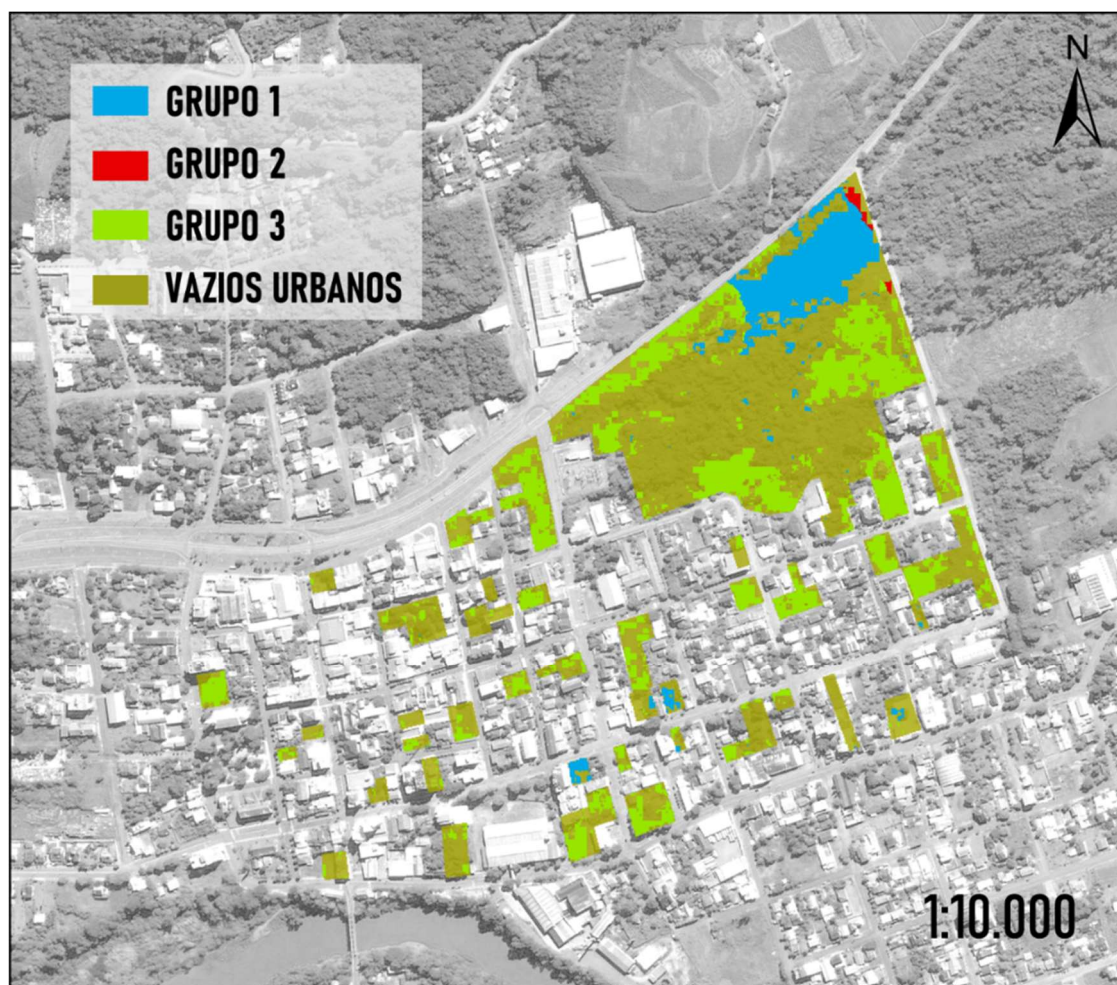


Figura 145: Vazios urbanos, constituindo-se em áreas potencialmente aptas para a implantação de hortas urbanas, no município de Feliz. (Elaborada pela autora, 2022)

Damásio e Machado (2013) destacam, também, outra limitação de caráter ambiental relevante, no território da municipalidade de Feliz: trata-se das áreas potencialmente alagáveis, devido ao extravasamento do Rio Caí, durante o período de chuvas intensas. Tais eventos de cheia provocam o alagamento de parcela expressiva do território municipal. Embora a maior parte das áreas atingidas constitua áreas de uso agrícola ou áreas vazias, também são identificáveis alagamentos nas áreas construídas.

O Plano Diretor Participativo do Município de Feliz define as áreas de alagamento recorrente, em função das cheias do rio Caí, como Zona de Ocupação Restrita (ZOR), não sendo admitida a edificação nesses espaços. Já, as áreas sujeitas a alagamentos menos recorrentes são definidas como Zona de Ocupação Semirrestrita (ZOSR), nas quais se admite edificar, desde que sob pilotis e acima da cota de enchente. Em ambos os casos, é permitida a instalação de atividades

temporárias, ou o seu uso por atividades ao ar livre, como se caracterizam as hortas comunitárias.

Na Figura 146, identificam-se as áreas potencialmente aptas para a implantação de hortas urbanas, e que estão situadas em áreas alagáveis no município de Feliz. Nesse recorte, as áreas disponíveis totalizam 48,6 ha, dos quais: 24% correspondem ao grupo 1; 59%, ao grupo 2; e 17% ao grupo 3. Trata-se de uma área suficiente para atender à 36% da demanda local, conforme estimado por Souza (2009). Além dos benefícios já evidenciados, como para a produção local de alimentos, esta seria uma alternativa viável para o uso desses espaços de maneira segura, garantindo a permeabilidade do solo.

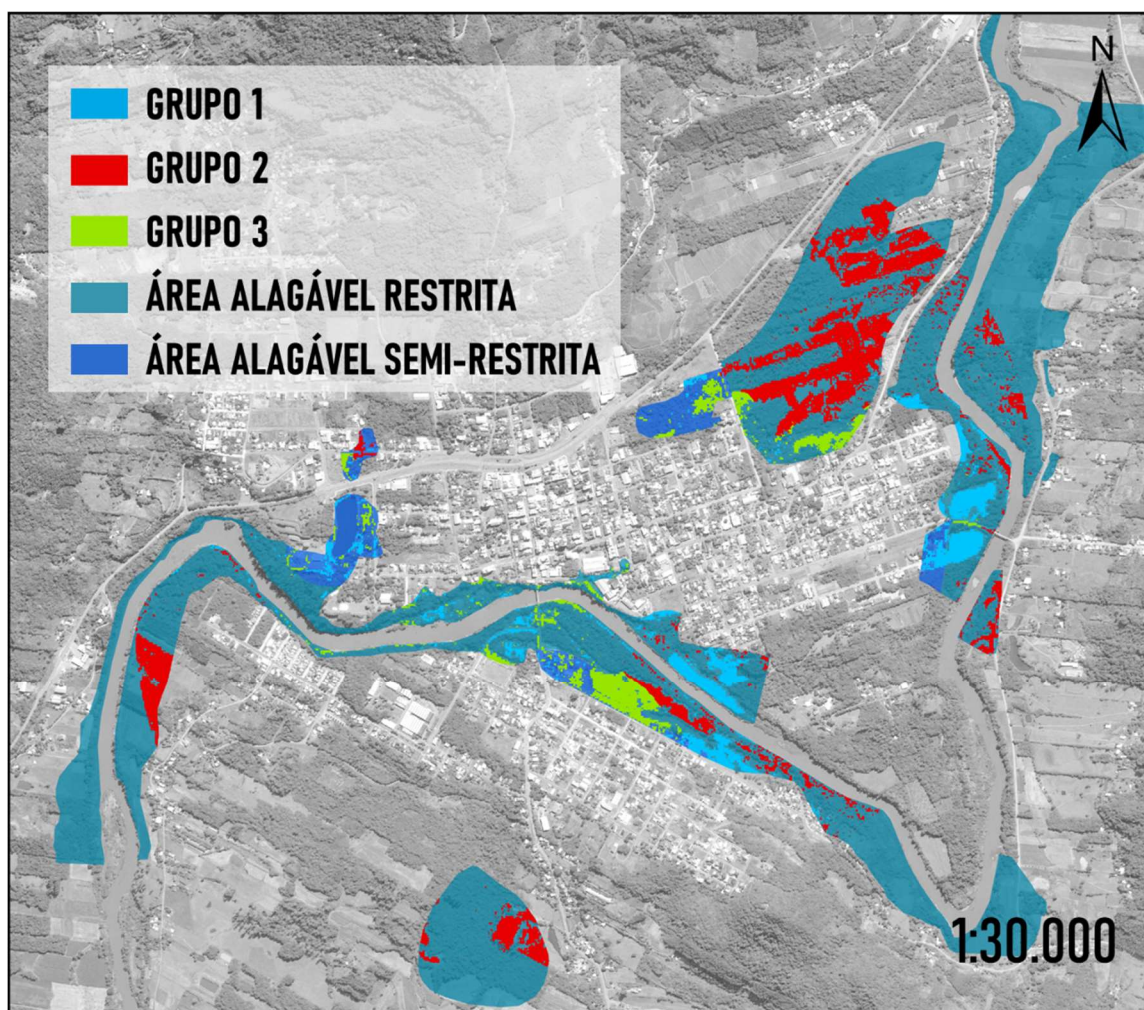


Figura 146: Áreas disponíveis, em zonas alagáveis, para implantação de hortas urbanas no município de Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

Entre as áreas alagáveis situadas em vazios urbanos, é possível identificar uma área de 1,2 ha, com potencial para a produção urbana de alimentos. Tais áreas são apresentadas na Figura 147, sendo: 19% delas classificadas no Grupo 1; 1%, no Grupo 2; e 80%, no Grupo 3. A utilização desses espaços na produção de alimentos pode garantir que o uso dado ao solo contribua para a infiltração das águas de escoamento superficial, na área urbanizada do município, auxiliando na redução dos riscos de inundações urbanas. Adicionalmente, a utilização desses espaços, para a produção hortícola dentro da malha urbana, pode auxiliar na sua caracterização como espaços positivos, que poderão contribuir, diretamente, para a distribuição dos benefícios urbanos.

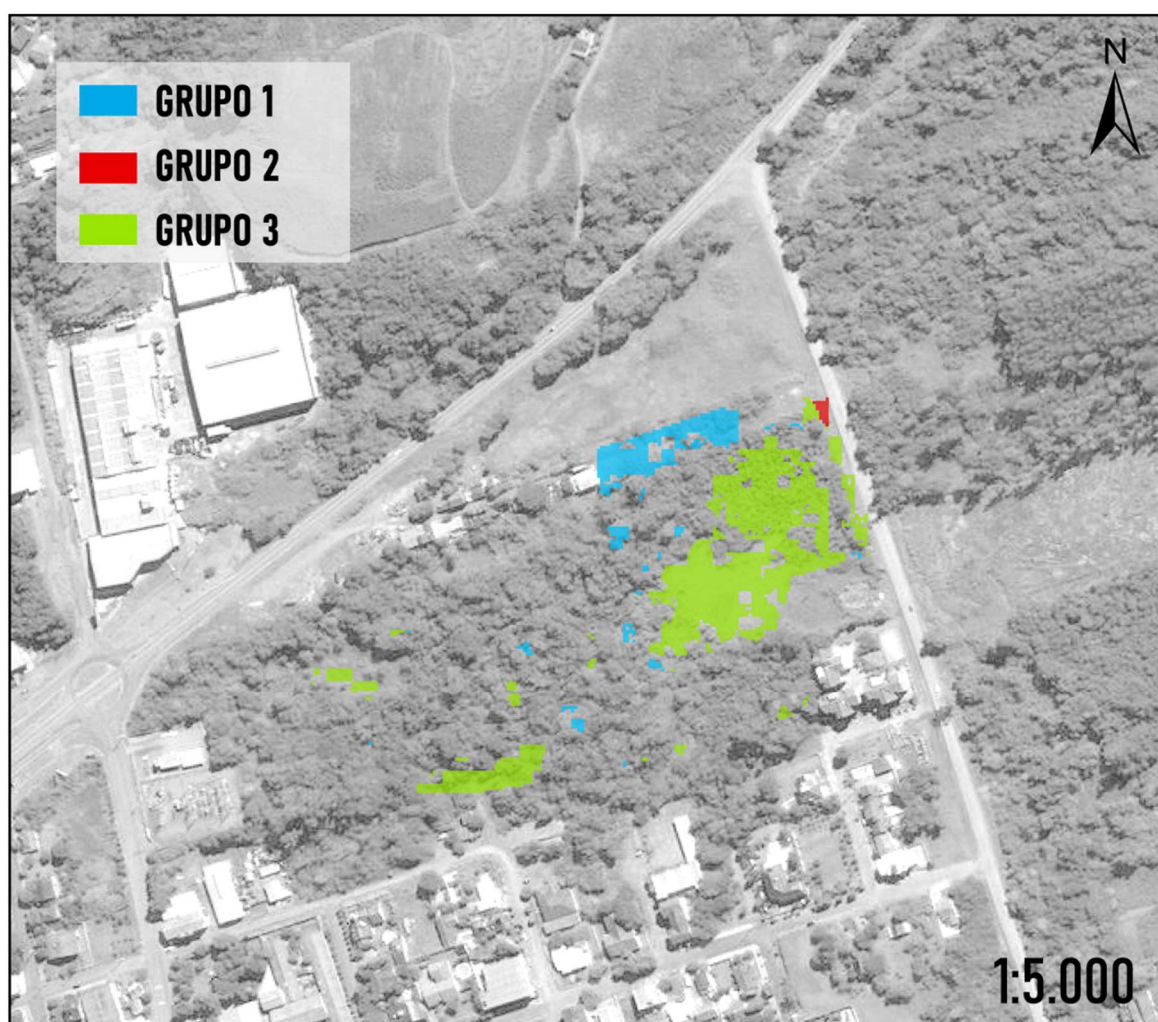


Figura 147: Áreas disponíveis, em vazios urbanos e alagáveis, para implantação de hortas urbanas, no município de Feliz.
(Elaborada pela autora, 2022)

6 APLICATIVO WEB: SIG VALE DA FELICIDADE

Entender a cidade como um organismo vivo advém do reconhecimento de sua natureza dinâmica. Logo, qualquer ferramental que se proponha auxiliar o estudo dos processos urbanos precisa, ele próprio, ser dinâmico e flexível. Nesse contexto, buscou-se, ao longo do processo de desenvolvimento da presente tese, demonstrar como novas ferramentas e métodos de análise de dados podem contribuir para a compreensão da complexidade dos sistemas urbanos.

Verificou-se, ainda, ser necessário aprimorar, não apenas a metodologia adotada nos estudos dos processos urbanos, mas também a forma como os dados associados aos sistemas urbanos são apresentados, de modo a permitir uma melhor identificação e caracterização de cada situação específica. As formas usuais de apresentação de dados, e que são específicos a cada sistema urbano, quando representadas em imagens estáticas, acabam por limitar a visualização de detalhes importantes e por dificultar a sua atualização, com a incorporação de novos dados, bem como a utilização de tais dados em trabalhos posteriores.

O uso efetivo dos dados específicos a cada realidade, contudo, requer o acesso a arquivos gerados em formato georreferenciado, o que permite, não apenas melhorar a visualização dos resultados, mas também sua utilização como dados de entrada em outros estudos e análises.

Nesse contexto, foi desenvolvido o aplicativo “SIG Vale da Felicidade”²⁵. Trata-se de uma plataforma online, baseada em nuvem, destinada ao mapeamento dos principais resultados deste trabalho. A plataforma de informações georreferenciadas foi desenvolvida no ambiente ArcGIS Online, que possibilita a criação de aplicativos ligados a um site central da web, o qual permite aos usuários criar, personalizar, analisar e compartilhar dados e mapas. As principais ferramentas disponíveis no aplicativo SIG Vale da Felicidade estão ilustradas na Figura 138.

²⁵ O aplicativo criado pode ser acessado por qualquer usuário da web através do site, hospedado no seguinte endereço: <https://arcg.is/1OC00r1>.



Figura 138: Layout e ferramentas do aplicativo SIG Vale da Felicidade.
(Elaborado pela autora, 2022)

A navegação por entre as diversas camadas disponíveis no aplicativo possibilita visualizar detalhes, antes não visíveis nos recortes apresentados nas seções anteriores do presente documento. A tabela de atributos de cada camada também está disponível para consulta online. Além disso, é possível pesquisar um endereço ou localização específica e verificar os detalhes das legendas das camadas ativas. O aplicativo permite, também, a realização de algumas operações básicas, que são: a medição de áreas; a medição da distância entre pontos; e a identificação da latitude e longitude de pontos selecionados pelo usuário. O aplicativo pode ser facilmente compartilhado, via link gerado no campo “compartilhamento”, ou embutido a sites da web, por meio de código, também disponibilizado no referido campo.

Dessa forma, o aplicativo tem condições de atender a todos os tipos de usuário, desde os mais experientes no uso de softwares de geoprocessamento, até os menos experientes. Ao público geral, é possível a navegação pela plataforma online, de forma intuitiva e sem a necessidade de ferramentas ou treinamento específico. Entende-se ser fundamental que esse público menos experiente possa ter acesso aos dados disponibilizados, pois ele inclui, também, tomadores de decisão, que são indivíduos e/ou instituições importantes nos processos aqui referidos.

Ademais, estão disponíveis ferramentas destinadas a usuários com habilidade prévia em geoprocessamento, como técnicos e pesquisadores. Esses usuários podem utilizar os resultados obtidos em seus estudos e análises, podendo inserir novas camadas de informação diretamente

de seu computador, através do endereço URL ou do banco das camadas gratuitas disponíveis no ArcGIS Online. É importante destacar que o *download* dos arquivos referentes às camadas de informação disponíveis, em formato adequado para o trabalho em *softwares* de geoprocessamento, pode ser feito por usuários com cadastro na plataforma do ArcGIS Online, podendo isto ser realizado gratuitamente²⁶. Adicionalmente, os arquivos também poderão ser acessados sem necessidade de cadastro no link mantido pela autora²⁷. Todas as camadas disponibilizadas são de livre utilização, mediante a citação do presente documento, como referência de fonte de dados.

O aplicativo, desta maneira, possui um papel fundamental, não apenas no aumento da transparência dos resultados apresentados no presente trabalho, como, também, no sentido de envolvimento das comunidades e dos tomadores de decisão, em relação aos temas de relevância local. Enquanto se busca, com a divulgação dos resultados neste formato, contribuir para o enfrentamento dos desafios urbanos, espera-se, também, que os usuários possam auxiliar a identificar possíveis lacunas em pesquisas e assim contribuir para melhorias nos resultados. De forma colaborativa, então, poderemos construir um espaço digital em constante evolução, que facilite o engajamento e diálogo, relativamente a soluções para problemas reais.

²⁶ Situação da política de compartilhamento de dados da plataforma ArcGIS Online em 04 de maio de 2022.

²⁷ Disponível em:

https://drive.google.com/drive/folders/10PE1p2gbniUZUEgFjHPC8JCH4CIhh_Tv?usp=sharing

7 CONCLUSÕES

A análise dos resultados alcançados neste trabalho possibilitou verificar como a aplicação de novas tecnologias podem contribuir para a resiliência e sustentabilidade de sistemas urbanos. Diferentes análises baseadas em dados foram aplicadas, ilustrando como a associação de dados interdisciplinares e de natureza espacial pode contribuir para a identificação de padrões, assim como para o aprofundamento do estudo de fenômenos urbanos.

Acredita-se ter atingido o propósito central desta pesquisa: **o de propor uma estrutura-piloto, que possibilitasse avaliar subsistemas urbanos, em pequenas e médias municipalidades brasileiras, com base em ferramentas de geonálise e de aprendizado de máquinas, com base em uma abordagem sistêmica, como elemento integrador.**

Entende-se, pois, que as principais contribuições desta pesquisa estão associadas a dois aspectos: o **primeiro**, no estabelecimento de procedimentos metodológicos para o tratamento do tema; e, o **segundo**, no aprofundamento de estudos sobre a natureza complexa dos sistemas urbanos. Diante disso, as considerações finais são apresentadas em dois blocos. No primeiro deles, faz-se uma reflexão sobre os estudos elaborados, para o alcance dos objetivos propostos, bem como são destacados os principais apontamentos decorrentes da análise local. No segundo, realiza-se uma avaliação mais ampla sobre as cidades, a partir de seu entendimento como um sistema vivo e complexo. O capítulo é concluído com a colocação das principais limitações do trabalho e com a proposição de estudos futuros.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, buscou-se apresentar alguns dos principais conceitos relacionados ao pensamento sistêmico, admitindo-se que ele seja um modelo adequado ao estudo da complexidade organizada, característica dos sistemas urbanos (*Capítulo 3*). Ainda na construção do arcabouço teórico, identificaram-se novas tecnologias de baixo custo, aplicáveis na avaliação dos sistemas urbanos e alinhadas à abordagem sistêmica. As metodologias para avaliação desses sistemas, com o uso de técnicas de geonálise e aprendizado de máquinas foram, também, abordadas no referido capítulo, concluindo a **Etapa I**, proposta neste trabalho.

Na **Etapa II**, foi apresentada a área de estudo, delineando-se elementos que indicam que a região do Vale do Caí constitui uma comunidade qualificada para o estudo proposto (*Capítulo 4*). Entende-se que tal etapa constitui um **requisito** para a definição dos contornos que possibilitaram a proposição de uma estrutura piloto para a avaliação de sistemas urbanos, admitindo-se tal estrutura como aplicável a pequenas e médias municipalidades brasileiras. Particularmente, o aprofundamento do conhecimento da área de estudo foi fundamental, também, para a escolha do sistema integrador, que constituiu a **meta específica (g)**, tendo sido reconhecida a vocação do Vale da Felicidade quanto à produção de frutas e hortaliças.

Já, a **Etapa III** foi determinante para o alcance do objetivo geral deste trabalho. Esta etapa compreendeu, inicialmente, a definição da estrutura piloto do trabalho (**meta específica (a)**). Já, as metas específicas **(b)**, **(c)**, **(d)**, **(e)** e **(f)** estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento do roteiro metodológico definido nessa estrutura. A etapa é concluída com o estudo integrador, definido pela **meta específica (g)**.

Para o alcance da **meta específica (a)**, foram **identificados os subsistemas urbanos passíveis de serem estudados sob a perspectiva da, assim denominada, ciência dos dados**. Para tal, considerou-se a limitação de acesso a bancos de dados amplos, que, no contexto brasileiro, constitui um obstáculo para a tomada de decisões orientadas por dados. Logo, foram exploradas, com base em dados disponíveis, formas de ampliar a compreensão das interconexões entre subsistemas urbanos, de modo a possibilitar avançar na tomada de decisões com base em informações, como uma alternativa àquelas baseadas unicamente em critérios gráficos, de forma ou causa, ou mesmo políticos. Considerando o conjunto de dados espaciais abertos ao acesso público, e disponíveis para todo o território nacional, foi possível identificar três subsistemas, que possibilitaram a construção da estrutura piloto de análise proposta, sendo eles: a ocupação do território; a dinâmica socioespacial de inclusão social no ambiente construído; e a análise da paisagem, nas escalas regional e intraurbana. Entende-se que, embora não limite as possibilidades de análise, a escolha dos sistemas a serem avaliados foi uma estratégia importante no sentido de possibilitar reprodutibilidade do estudo em pequenas e médias municipalidades brasileiras. Esta meta específica é, desta forma, também um **requisito** para o desenvolvimento e alcance do objetivo principal do trabalho.

Para a avaliação da **ocupação do território, em termos das densidades populacionais e da rede das cidades** que compõem a área de estudo, foi proposta a utilização de técnicas baseadas em geoestatística e análise de redes, de maneira a atender à **meta específica (b)** (*seção 5.1*).

Entende-se que a metodologia empregada, além de reproduzível para todo o território nacional, possibilitou um entendimento mais amplo das formas de ocupação do território urbano e sobre os elementos de conexão entre as cidades constituintes do, assim denominado, Vale da Felicidade. Adicionalmente, os resultados obtidos a partir do alcance desse objetivo, proporcionaram a definição de um recorte de estudo importante, que foi utilizado como referência para avaliações na escala intraurbana: os Centros de Densidade Populacional (CDP).

Por meio de ferramentas baseadas na geoestatística, foi possível alcançar a **meta específica (c)**, que propunha a avaliação da **ocupação socioespacial e a identificação de padrões espaciais de inclusão e exclusão social** (seção 5.2). A análise realizada possibilitou um aprofundamento do conhecimento sobre a dimensão socioeconômica da sustentabilidade no Vale da Felicidade. A análise exploratória dos dados espaciais possibilitou a verificação das condições de inclusão social, nos CDPs dos municípios. Foi possível caracterizar o território como tendo um elevado nível de inclusão, o que corrobora com diversos estudos anteriores. Tal resultado pode ser interpretado como mais um fator contribuinte para que a área de estudo seja uma referência quanto à sustentabilidade.

Os indicadores e índices avaliados representam um importante instrumento para a obtenção de informações, com potencial de complementar outras ferramentas metodológicas. A combinação de metodologias, dados e softwares constitui uma importante estratégia para a identificar aspectos contribuintes para o atendimento às necessidades humanas, podendo ser utilizadas, assim na busca da sustentabilidade para a sociedade, de uma forma generalizada. Nesse sentido, entende-se que a identificação de padrões espaciais locais constituiu uma importante contribuição, dentro do campo de estudo, uma vez que possibilitou, não só considerar as características globais de inclusão social, mas, também, identificar os principais agrupamentos espaciais do indicador no contexto local.

De maneira mais ampla, este estudo identifica a potencialidade do uso de indicadores, particularmente daqueles aqui analisados, na construção de um diagnóstico rápido, eficiente e baseado em dados normalmente facilmente acessáveis em comunidades. Além disso, o diagnóstico pode ser aplicado na avaliação da inclusão social de municípios de pequeno e médio porte, visto que demonstrou ser uma ferramenta adequada para a análise de distintas realidades.

Os resultados assim obtidos poderão contribuir de diversas maneiras: no planejamento de políticas de inclusão social; na definição das prioridades de ação e investimentos locais; no

acompanhamento da implementação de políticas públicas; no destaque aos pontos positivos, que possam servir de modelo ao desenvolvimento local; e no mapeamento das principais fragilidades dos municípios de uma região. Desse modo, propõe-se uma análise integrada e espacializada de variáveis socioeconômicas, na definição de áreas prioritárias para fins de investimento, assim como para a geração de renda e emprego, de modo a possibilitar um melhor direcionamento às decisões que busquem soluções mais adequadas, considerando os problemas mais críticos de cada comunidade.

Em cumprimento à **meta específica (d)**, a **análise espacial e temporal da paisagem regional (seção 5.3.1)** é proposta considerando quatro variáveis: o índice de vegetação; o índice de área construída; a capacidade de sequestro de carbono pela vegetação; e a evolução do campo térmico. Além de técnicas tradicionais de análise espacial, foram utilizadas ferramentas de geoestatística, para o reconhecimento de padrões de associação espacial, e de *data mining*, para a identificação de padrões emergentes.

Destaca-se que, embora já bem consolidada no âmbito dos estudos urbanos, a análise espacial, em nível regional, ganha uma nova perspectiva, em um contexto no qual o volume de dados disponíveis é massivo. Tal circunstância é evidenciada na avaliação dos padrões espaciais emergentes, que integrou a presente investigação. Considerando as variáveis utilizadas na análise, a complexidade inerente aos espaços verdes, bem como suas múltiplas funções, foi possível verificar a importância de abordagens alternativas mais adequadas, tanto para o tratamento de tal volume de dados, como para neles identificar padrões.

O estudo realizado possibilitou identificar que os métodos tradicionais de análise apresentam uma capacidade limitada, particularmente em se tratando de áreas mais críticas, as quais necessitam de maior e particular atenção quanto à implementação de ações. Nesse contexto, as ferramentas baseadas na geoestatística e na mineração de dados possibilitaram uma abordagem interessante e com grande potencial para a identificação dos problemas e aptidões locais. Ainda que não inerentemente preditivos, os métodos empregados possibilitaram identificar a mudança de padrões dos agrupamentos terrestres, caracterizados por altas temperaturas superficiais e por altos valores do NDBI, ao longo do tempo.

Cabe destacar que, nesta direção, foram evidenciados padrões emergentes de alta temperatura superficial, nos municípios do Vale da Felicidade, em 29% de todo o território, sendo identificados como espacialmente agrupados nos CDPs.

Assim, também, tendências associadas a agrupamentos de altos índices de área construída foram caracterizadas como presentes em 27% de todo o território, sendo também frequentes nos CDPs dos municípios. A identificação, tanto de tendências de mudanças mais estáveis, quanto as mais críticas, são relevantes para a avaliação da dinâmica territorial e podem contribuir para o planejamento urbano com informações importantes para a sua reorientação e direcionamento a padrões mais sustentáveis de projeto urbano, que considerem e respeitem as realidades locais específicas.

É reconhecida, também, a contribuição de diferentes formas de ocupação do território e de área construída, em nível local, na manifestação de padrões térmicos críticos. Nesse sentido, a **meta específica (e)** foi alcançada a partir da **análise da paisagem intraurbana** (cf. seção 5.3.2). Tal avaliação, adicionalmente, também pode ser considerada um elemento fundamental para a compreensão do ambiente construído, em seu todo, podendo tal análise ser expressa em termos de uso e ocupação do solo e de métricas da paisagem.

Tradicionalmente aplicadas a estudos sobre ecologia da paisagem e em escalas regionais, as métricas da paisagem se mostraram úteis, também, em avaliações na escala intraurbana. Observa-se que esses parâmetros podem orientar planos estratégicos setoriais, contribuindo para a gestão espacial dos recursos naturais e para o ordenamento territorial das cidades em expansão. A caracterização da paisagem, por meio da análise do uso e ocupação do solo e com o auxílio de métricas, pode apoiar a identificação de padrões úteis ao entendimento da dinâmica territorial e contribuir para a tomada de decisão, por exemplo, em projetos de planejamento ambiental, de zoneamento urbano, de delimitação de corredores ecológicos e da malha urbana.

Além de merecerem ser destacados os avanços possibilitados por uma nova perspectiva, baseada na análise de dados espaciais, em termos de análise do espaço urbano nas escalas regional e intraurbana, entende-se que uma das principais contribuições da presente pesquisa esteja associada à **análise exploratória multiescalar**. Nesta direção, com base nos dados disponíveis e nas análises desenvolvidas, foi possível verificar a influência, tanto da composição do uso e ocupação do solo, como de métricas das áreas verdes – área, perímetro, distância às áreas verdes circundantes, continuidade e dimensão fractal – nas variáveis de temperatura superficial e do índice de sequestro de carbono, com base em modelos lineares de previsão e técnicas de geoanálise e de aprendizado de máquinas, o que possibilitou o alcance da **meta específica (f)** (seção 5.3.3).

A análise exploratória de regressões mostrou-se útil, como método indutivo, para a avaliação das relações existentes entre variáveis dependentes e independentes. É importante destacar as diferentes contribuições das classes de vegetação rasteira, de solo exposto e de água, que, a depender do modelo, foram identificadas como positivas ou negativas, na determinação da temperatura de superfície e do índice de sequestro de carbono. No modelo selecionado para predição da temperatura de superfície, a vegetação arbustiva e a altitude apresentaram contribuições negativas (isto é, reduzindo a temperatura), enquanto a vegetação rasteira, o solo exposto e as áreas urbanas edificadas apresentaram contribuições positivas. O modelo de previsão do índice de sequestro de carbono possibilitou reconhecer contribuições positivas (sinalizando um aumento de sequestro de carbono) às classes de vegetação arbustiva, de vegetação rasteira e de solo exposto, enquanto as áreas urbanizadas resultaram em uma diminuição no seu sequestro.

Embora identificada a importância dos modelos de regressão linear, para o entendimento da influência da composição do uso e ocupação do solo nas variáveis analisadas, o emprego de redes neurais artificiais foi ainda mais efetivo nessa direção, seja no tocante à inter-relação entre as variáveis (R e R^2), seja em termos de acurácia do modelo (MSE). Desta forma, as análises auxiliadas pela técnica de aprendizado de máquinas, em especial, contribuíram de modo mais efetivo para a compreensão das relações complexas entre os dados.

Já, a clusterização mostrou-se particularmente útil na identificação de padrões e tendências naturais nos dados. Além de sintetizar diversas informações sobre o ambiente construído, a metodologia possibilitou a classificação das áreas, de acordo com a forma de uso e ocupação do solo. Desta forma, entende-se que a clusterização constitui um recurso valioso, no tocante a planejamento urbano, no sentido da identificação de áreas contínuas com características semelhantes. Essas informações podem contribuir, tanto para a identificação de padrões insustentáveis, quanto no direcionamento do sistema à sustentabilidade.

Desse modo, a partir da identificação de padrões e tendências, acima referida, foi possível constatar a importância da presença e manutenção das áreas de vegetação arbustiva, tanto para o controle das temperaturas de superfície, como para a garantia de maiores índices de sequestro de carbono.

Nesta direção, destaca-se a importância de emprego da técnica de clusterização de dados *k-means*, inclusive como método de identificação de diferentes padrões de áreas verdes,

considerando as métricas associadas a tais espaços. Particularmente, merecem destaque as métricas contribuintes para a caracterização dos espaços urbanos, em termos de área, perímetro, proximidade a outras áreas verdes, continuidade e complexidade de forma, todos contribuintes para o projeto e planejamento de tais espaços.

Nos municípios selecionados para tal caracterização, observou-se que as temperaturas superficiais são menores nas áreas de vegetação de maior área e perímetro. A fragmentação dos espaços verdes e a distância entre esses fragmentos também influenciam nas temperaturas médias. Já, os índices de CO_{2flux} são inferiores nos fragmentos menores. Além disso, a continuidade e a proximidade a outras áreas verdes contribuem para o seu aumento. No entanto, observou-se que entre espaços verdes de maior área, o ganho em eficácia no processo de sequestro de dióxido de carbono da atmosfera não ocorre de forma proporcional ao aumento de área.

Entende-se que a proposição da estrutura piloto e as análises dela decorrentes atendem aos objetivos inicialmente estabelecidos para o presente trabalho. A partir dos resultados obtidos, foi possível realizar uma associação das variáveis analisadas em um estudo integrador, de modo a **qualificar e quantificar as relações entre os subsistemas urbanos** estudados, o que foi tornado possível com o emprego de técnicas de análise de redes, classificação orientada a objeto e *clusterização* de dados.

Graças à aptidão do Vale da Felicidade, particularmente para a produção de frutas e hortaliças, foi possível investigar e ilustrar de que forma novas técnicas computacionais poderão auxiliar no entendimento das relações entre alguns dos elementos que constituem o seu **sistema alimentar urbano**, e como essa compreensão contribuir para crescentes avanços em seu direcionamento a uma também crescente sustentabilidade.

O alcance da **meta específica (g)**, embora não constituindo uma das etapas da estrutura piloto inicialmente proposta, veio a se tornar uma etapa fundamental para o alcance do objetivo principal deste trabalho (*seção 5.4*). Nessa direção, procurou-se, inicialmente, caracterizar o panorama da produção hortícola nos municípios do Vale da Felicidade, com base em dados abertos e especializados.

Neste caso específico, identificou-se a produção como associada à agricultura familiar e com origem em minifúndios ou pequenas propriedades, que estavam situados entre 1,5 e 13 km dos respectivos centros de maior densidade populacional. O risco de ameaças à segurança alimentar

na região também foi verificado, considerando: ameaças climáticas; vulnerabilidade dos sistemas sociológicos; e o grau de exposição desses sistemas. Verificou-se que todos os municípios analisados estavam expostos a riscos, de grau baixo a médio, sendo que o índice de vulnerabilidade foi categorizado como aquele com maior contribuição para o índice de risco.

Entende-se que tais avaliações possam ser complementadas, já que a localização dos produtores e dos mercados de consumo local podem constituir fatores contribuintes para a minimização dos impactos associados ao transporte de alimentos, que naturalmente depende das distâncias percorridas, assim como do número de intermediários entre produtor e consumidor. Tais aspectos poderão vir a ser otimizados para reduzir a vulnerabilidade do sistema diante de eventos climáticos extremos, assim como para aumentar sua capacidade adaptativa, fatores que certamente contribuem para a redução dos riscos relacionados à segurança alimentar.

Considerando os benefícios decorrentes de uma cadeia de produção e consumo mais sustentável, identificou-se que o cultivo de alimentos em áreas urbanas pode constituir um elemento de grande valia para que pequenas municipalidades sejam orientadas em direção a uma maior sustentabilidade. Nesse sentido, destaca-se, também, a importância da contribuição do detalhamento realizado para o município de Feliz. Com uma análise multivariada, foi possível avaliar, simultaneamente, as características das áreas disponíveis, em termos de: área contínua disponível; população potencialmente atendida por essas áreas; situação de inclusão social das famílias; e a temperatura superficial no município.

Embora os resultados específicos obtidos para o município de Feliz possam fornecer indicações importantes de áreas potencialmente disponíveis para a implantação de hortas urbanas no município, destaca-se a contribuição mais ampla que o estudo de caso pode oferecer: trata-se de um exemplo ilustrativo de como a classificação dessas áreas, pelo método de clusterização *k-means*, pode se mostrar particularmente útil, no sentido de contribuir na elaboração de um mapeamento suficientemente claro – de maneira a possibilitar a sua replicação em outras municipalidades – mas, também, suficientemente flexível – de modo tal, que este tipo de mapeamento possa ser ampliado e adaptado, em função das características e necessidades específicas a cada local.

A aplicação dessas técnicas, em conjunto com a consideração da componente espacial, pode contribuir em dois aspectos associados ao estudo das cidades: na identificação de diretrizes de

sustentabilidade, que possam servir de orientação a outras municipalidades; e na condução das comunidades a uma redução de sua vulnerabilidade.

Contudo, a elaboração de um planejamento urbano, que permita adaptações e seja responsável para com as mudanças futuras, requer, e é amplamente dependente, do acesso a recursos, informações e tecnologia.

Nesse sentido, a **Etapa IV**, proposta no presente trabalho, foi concluída com o alcance da meta **específica (h)**, com o **desenvolvimento do aplicativo web “SIG Vale da Felicidade”**, constituindo um importante subproduto dos estudos elaborados para o Vale da Felicidade (*Capítulo 6*). O aplicativo possui o potencial de desempenhar um papel de alta relevância, não apenas em termos de consulta e acesso a todas as camadas de informações georreferenciadas produzidas, mas, também, em direção à divulgação de resultados de novas abordagens e ferramentas.

Ainda que reconhecidas as limitações e pontos ainda a serem aprofundados na estrutura-piloto proposta, entende-se ser possível afirmar que sua aplicação no Vale da Felicidade constitui uma referência sobre a análise de subsistemas urbanos, amparada por dados gratuitos e públicos, temporais e espaciais.

Entende-se que os resultados obtidos por meio da metodologia proposta possam fornecer subsídios a outros estudos urbanos e aos tomadores de decisão. Destaca-se que a metodologia está associada a um ferramental de baixo custo e com potencial de reprodução e adaptação para o estudo de pequenas e médias municipalidades brasileiras. Espera-se, assim, ter contribuído para o aprofundamento das análises e para a orientação de políticas de transição, que sejam tanto realistas, quanto mais eficazes.

Acredita-se que, além de ser condizente com a dinâmica urbana, a metodologia proposta possa contribuir para a definição de padrões flexíveis e adaptáveis que auxiliem, de forma efetiva, no enfrentamento dos desafios urbanos. Sendo uma das principais propostas deste trabalho a generalização de relações e a análise multivariada, baseadas em técnicas de inteligência artificial, também se acredita haver contribuído para uma evolução no sentido de aprimorar, em termos de uma maior sustentabilidade, a abordagem da complexidade organizada das temáticas que envolvem a cidade.

Trata-se, pois, de uma ferramenta importante para auxiliar na tomada de decisões, uma vez que permite lidar com a sobreposição de conteúdos, que, em geral, são fragmentados, pela maneira como os gestores urbanos estão habituados a setorizar o conhecimento. As particularidades de cada local, bem como os recursos localmente disponíveis variam de forma ampla. Logo, a aplicação de metodologias flexíveis e replicáveis é importante, pois elas se ajustam ao contexto de cada municipalidade, sem que, entretanto, haja perda da robustez e da confiabilidade de seus resultados.

Os resultados apontam para a possibilidade de se incorporar ferramentas adicionais, associadas à complexidade, nos estudos dos sistemas urbanos, que considerem as sobreposições e conexões entre as diversas camadas *co-existent*s no território urbano, e que, em última análise, reconheçam que *uma cidade não é uma árvore*²⁸.

7.2 UMA CIDADE NÃO É UMA ÁRVORE: REFLEXÕES SOBRE A VIVACIDADE DOS SISTEMAS URBANOS

“**A cidade não é uma árvore**”: a afirmação de Alexander (1965) esclarece que a estrutura de uma cidade é mais refinada do que usualmente imaginamos, pois os elementos que a compõe se sobrepõem e se interceptam. As relações que constituem uma cidade são, desta forma, uma estrutura em “**semi-trama**”. Em termos mais familiares, entendemos que a cidade pode ser vista como uma rede complexa, dada sua topologia diferenciada. Em muitos sentidos, tais características são distintas daquelas da geometria euclidiana e da estatística gaussiana, que correspondem a formas e fenômenos essencialmente regulares.

Conforme discutido na *seção 3.1.1*, a simplificação associada ao modelo estrutural em “árvore” pode dificultar o entendimento dos sistemas complexos, que, de fato, seguem o modelo em “semi-trama”, onde ocorrem sobreposições dos sistemas que o integram. Para além da importância do modelo no desenho urbano, destaca-se sua relevância, enquanto uma abordagem conceitual das questões urbanas, compostas por redes complexas e baseadas em interações entre uma multiplicidade de agentes, estáticos e em movimento, no espaço e no tempo.

²⁸ Tradução do título original, “*A City is not a Tree*”, de Alexander (1965)

Os domínios da sustentabilidade urbana só podem ser isolados analiticamente, visto que, na prática, eles estão interconectados e se influenciam mutuamente. Contudo, considerar todas as variáveis envolvidas nesse sistema pode ser uma tarefa, na prática, inviável. A adoção de uma estrutura em árvore contribui, em parte, para essa dificuldade em coordenar um conjunto muito amplo de ajustes, entre forma e contexto socioespaciais, muito presente entre os projetistas do espaço urbano. Adicionalmente, destaca-se que, à medida que mais camadas de informação são incluídas na análise, a estrutura cresce em termos de sua complexidade. É justamente nesse aspecto que seu entendimento, da cidade como uma “semi-trama”, torna-se ainda mais relevante.

Nesse sentido, a montagem do arcabouço metodológico para conduzir a presente análise pode ser considerada uma das principais contribuições do trabalho, visto que considera a cidade como um sistema de complexidade organizada, sem, no entanto, a pretensão de esgotar ou de dominar seu entendimento. Além da contribuição direta dos resultados apresentados para a tomada de decisões baseadas em dados, eles podem auxiliar na compreensão analítica da complexidade do ambiente urbano, seja com a aplicação do método de clusterização *k-means*, considerada sua capacidade de identificar padrões dinâmicos e de avaliar as principais componentes de um determinado comportamento do sistema, seja com o uso de redes neurais artificiais para o ajuste de funções complexas. A própria estrutura algorítmica, baseada na identificação de padrões que facilitem o entendimento do relacionamento entre dados, parece também estar intimamente relacionada à natureza do sistema complexo, dinâmico e auto organizável.

Ainda à luz das teorias de Christopher Alexander aplicadas ao estudo do ambiente construído, aponta-se que também certas propriedades fundamentais dos sistemas vivos (*seção 3.1.2*) puderam ser indiretamente analisadas no presente estudo. Os **níveis de escala**, por exemplo, puderam ser identificados ao avaliar a dinâmica local, em relação a algumas variáveis, nas escalas regional, local e intraurbana. As relações encontradas possibilitaram verificar a escalabilidade das variáveis avaliadas, observando-se que as unidades mais básicas têm comportamento similar.

Quando se considera, também, as mudanças ocorridas ao longo do tempo, é possível verificar que o mapeamento de padrões emergentes, realizados na escala regional, pode ser de grande utilidade para situar estudos na escala do bairro – como ilustrado na aplicação realizada neste trabalho – ou mesmo, na escala da edificação. Também, a aplicação da estatística espacial

revela a importância dos níveis de escala, ao considerar como os dados regionais contribuem na análise de cada município.

Quanto à propriedade dos **centros fortes**, entende-se que as elipses de distribuição direcional são ferramentas que, embora de simplicidade conceitual e prática, podem contribuir de modo significativo para que sejam caracterizados os níveis de dispersão de uma cidade, identificando e hierarquizando seus centros. Do mesmo modo, a avaliação da **equidade no ambiente construído** pode revelar aspectos relevantes, que caracterizam os centros mais fortes, relacionados a outras variáveis, além, tão somente, da própria demografia.

As ferramentas utilizadas para a verificação de *outliers* e *clusters* locais, podem indicar, de maneira prática, como a propriedade da **rugosidade** está presente nos diversos sistemas urbanos. Reconhecer tais “indícios não médios” (JACOBS, 1992, p. 40) é uma etapa fundamental em direção ao equilíbrio entre a flexibilidade, necessária ao estudo do ambiente urbano, e uma delimitação clara e eficiente de seus elementos.

Tanto as propriedades de **intertravamento profundo**, quanto o **conceito de gradientes**, puderam ser observados, com a delimitação dos CDPs e com os estudos dos gradientes e transectos de variáveis importantes no ambiente urbano, como: os índices de vegetação; os índices de construção; as temperaturas de superfícies; e a capacidade de absorção do dióxido de carbono na atmosfera. A **não separação** do sistema é destacada ao avaliar a rede de cidades e os mapas de densidade a nível regional, evidenciando a influência que os centros locais exercem no funcionamento do todo. Já, por meio das métricas de estruturação da paisagem, foi possível verificar a existência de **ecos**, por meio da identificação de padrões autossimilares, em diferentes escalas, e que corroboram com a necessidade de uma visão integradora da paisagem urbana.

Como proposta para o fortalecimento da vivacidade dos sistemas urbanos, além de todos os seus benefícios citados ao longo do trabalho, em termos de aumento da resiliência do sistema, recomenda-se a implementação de **hortas urbanas**, pois elas possuem potencial para a requalificação do espaço intraurbano, observando-se, principalmente o aproveitamento de **vazios**, como espaços funcionais e a **boa forma**, na configuração do uso e ocupação do solo e o fortalecimento de **espaços positivos**.

Foi observado que os **princípios de vivacidade** dos sistemas urbanos constituem, em si, requisitos essenciais para a sua consolidação como comunidades resilientes, uma vez que

ambientes de grande vivacidade possuem uma maior capacidade de melhor responder a mudanças. Destaca-se que, nos resultados específicos para o município de Feliz, todas as propriedades de vivacidade, indiretamente avaliadas, puderam ser observadas com bastante clareza, fato que pode ser identificado como mais um fator contribuinte para que o município seja uma referência nacional quanto à sustentabilidade e um destaque local. Em ambientes com tais características, existe uma maior probabilidade de existência de caminhos alternativos, que conduzam a uma transformação positiva da realidade local.

De maneira geral, destaca-se que, ainda que atemporais, as ideias de Christopher Alexander ganham num novo alcance, quando suportadas por essas novas tecnologias. Os métodos aplicados ilustram como é possível aproximar uma base conceitual, discutida em termos genéricos, a uma aplicação prática e reproduzível em qualquer municipalidade brasileira. A aplicação dessas técnicas deixa, ainda, um caminho traçado para a inclusão de outras variáveis, tais como: mobilidade urbana; percepção da população sobre a produção urbana de alimentos; distâncias a mercados locais; entre outras. À medida em que outras variáveis relevantes ao entendimento dos sistemas alimentares urbanos venham a ser inseridas no modelo, será possível realizar uma análise ainda mais aprofundada e complexa.

7.3 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

É importante lembrar que o presente estudo não visa explorar todas as possibilidades de análise do sistema urbano, dentro de sua complexidade, mas procura esclarecer sobre como os métodos e ferramentas atualmente disponíveis, que podem contribuir para a compreensão da complexidade da cidade. Ele, no entanto, oferece uma estrutura piloto, para que novas camadas de análise sejam adicionadas.

Ao mesmo tempo em que novas camadas de informação possam ser adicionadas para o aprimoramento das análises aqui desenvolvidas, entende-se que a falta de acessibilidade aos dados de entrada para tanto requeridos podem constituir, também, uma das principais limitações do método.

Em adição ao já conhecido desafio do acesso a dados públicos de informações sobre as cidades, ressalta-se que este estudo foi desenvolvido durante os primeiros anos da pandemia de COVID-

19, no Brasil, o que ainda mais limitou, por questões de segurança sanitária, a análise de duas importantes camadas de informação.

A primeira delas é relativa às informações georreferenciadas do Censo de 2020, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, que foi adiado para o ano de 2022. Esses dados poderiam tornar mais atuais e precisos, por exemplo, a definição dos CDPs e o mapeamento das variáveis de inclusão/exclusão social. Estima-se que, com a publicação dos resultados desse levantamento, venha a se tornar possível, não apenas a atualização desses dados, mas a sua avaliação em termos de sua evolução temporal.

A segunda camada de informação comprometida pelo cenário de pandemia foi a da coleta de informações sobre a percepção das comunidades analisadas quanto aos aspectos estudados. Em estudos futuros, sugere-se que seja incluída a análise da percepção da população em relação, por exemplo: aos *outliers* do CDI; aos padrões emergentes de temperatura, de índices de vegetação e de área construída; e aos padrões socioespaciais. O SIG Vale da Felicidade, proposto por esse estudo, poderá ser aprimorado, no sentido de auxiliar na sistematização da coleta dessas informações, podendo tornar-se, inclusive, uma ferramenta participativa.

A ausência de um banco de dados estruturados, assim como de uma atividade de compatibilização de dados com diferentes resoluções e naturezas também requererão atenção em futuros aprimoramentos da ferramenta. Entende-se que, embora atendidos satisfatoriamente os objetivos propostos no presente estudo, outras possibilidades de aprofundamento do estudo, inclusive no sentido da compatibilização dos dados, representam, em si, um novo, vasto e profundo desafio.

Diante da difícil tarefa de compreender as diversas possibilidades de configuração e dos cenários possíveis em um sistema urbano, a estrutura-piloto neste trabalho proposta pode ser entendida como um pequeno passo na tentativa de estruturar o conhecimento sobre as cidades, a qual poderão ser adicionados ainda mais dados, que possibilitem a caracterização de sua complexidade, de uma forma ainda mais completa. Neste sentido, longe de considerar esta como uma estrutura de análise fixa, o que se espera é que as avaliações aqui realizadas possam vir a inspirar, não apenas a novas aplicações, pautadas sob a mesma perspectiva, mas, também, o aperfeiçoamento, em si, das técnicas aplicadas.

Por fim, ressalta-se que a compreensão dos padrões e dos princípios que sustentam os sistemas vivos e complexos, devendo ser assim, inquestionavelmente, caracterizadas as cidades, seja de

fundamental importância para o sucesso das atividades de seus projetistas. Assim sendo, é essencial compreender que a construção do conhecimento e da sabedoria sobre tais sistemas continua sendo uma função eminentemente humana, sendo fundamental que tais projetistas aprofundem o seu conhecimento acerca de cada um dos processos presentes nas cidades, dentro de suas disciplinas específicas, sejam eles engenheiros, arquitetos, geógrafos, antropólogos, economistas, etc. Deve ser destacado, adicionalmente, que para avançar no entendimento sobre o relacionamento entre esses sistemas, ainda carecemos de um maior aprofundamento científico. Entende-se, pois, que para tal desenvolvimento de novas habilidades profissionais, requer-se, adicionalmente, a formação de equipes, que sejam, não só multi e inter, mas, também, transdisciplinares, diante da complexidade dos estudos urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHTERBOSCH, T. J. *et al.* **Synthesis of existing food systems studies and research projects in Europe**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.2777/004919>. Acesso em: 23 ago. 2020.

ACIOLY, C.; DAVIDSON, F. **Densidade Urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana**. Rio de Janeiro: Mauad Editora Ltda, 2011.

ACKOFF, R. L. From Data to Wisdom. **Journal of Applied Systems Analysis**, Lancaster, v. 16, p. 3–9, 1989.

ALEXANDER, C. A City is Not a Tree. **Architectural Forum**, Boston, v. 122, n. 1, p. 58–62 (Part I), 1965.

ALEXANDER, C. **The Timeless Way of Building**. Berkeley: Oxford University Press, 1979.

ALEXANDER, C. **Tres Aspectos de Matematica y Diseno: la Estructura del Medio Ambiente**. Barcelona: Tusquets Editores, 1980.

ALEXANDER, C. **The Nature of Order: An Essay on the Art of Building and The Nature of the Universe**. Berkeley: The Center for Environmental Structure, 2002.

ALEXANDER, C. New Concepts in Complexity Theory arising from studies in the field of Architecture: a response by Christopher Alexander. **Katarxis Nº3: New Science, New Urbanism, New Architecture?**, London, v. 3, n. 3, 2003. Disponível em: <http://www.katarxis3.com>. Acesso em: maio 2020.

ALEXANDER, C. Harmony-Seeking Computations: a Science of Non-Classical Dynamics Based on the Progressive Evolution of the Larger Whole. *In*: The Grand Challenge in Non-Classical Computation International Workshop, 2005, York. **Keynote Speakers [...]**. Disponível em: https://www.cs.york.ac.uk/nature/workshop/papers/Harmony-Seeking_Computation.pdf. Acesso em: 12 jun. 2019.

ALEXANDER, C.; SILVERSTEIN, M.; ISHIKAWA, S. **A Pattern Language**. Berkeley: Oxford University Press, 1977.

ALLEN, R. G. *et al.* **Sebal (Surface Energy Balance Algorithms for Land. Adv. Training Users Manual)**, Idaho: Idaho University, 2002. Disponível em: http://dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/Final%20Sebal%20Manual.pdf. Acesso em: 30 maio 2020.

ALMEIDA, C. M. de; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. *E-book*.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Gilberto_Camara2/publication/285864165_Geoinformacao_em_urbanismo_cidade_real_cidade_virtual/links/56817ef608ae1975838f8ae0/Geoinformacao-em-urbanismo-cidade-real-cidade-virtual.pdf. Acesso em: 07 fev. 2020

AMARAL, R. *et al.* Bases para o planejamento territorial urbano: Uso de imagens hiperspectrais para a identificação de áreas geradoras de funções ecológicas de suporte. **CIDADES, Comunidades e Territórios**, Lisboa, n. 41, p. 71–89, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15847/CCT.20152>. Acesso em: 22 mai 2021.

AMORIM, M. C. de C. T. Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil. **Finisterra**, Lisboa, v. LII, n. 105, p. 111-133, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18055/Finis6888>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ANDRADE, A. C. **Sustentabilidade e a Cidade: A contribuição das políticas urbanas para o desenvolvimento sustentável de um município brasileiro de pequeno porte – o caso de Feliz/RS**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ANDRADE, L. M. V. **Construção e Abertura: Diálogos Christopher Alexander – Jean Piaget**. 2011. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) – Faculdade de Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association – LISA. **Geographical Analysis**, Columbus, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>. Acesso em: 07 maio 2020.

BASU, S. *et al.* A complexity approach to defining urban energy systems. **Cities**, Amsterdam, v. 95, n. 102358, p 1-13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.05.027>. Acesso em: 08 ago. 2020.

BATTY, M. Building a science of cities. **Cities**, Amsterdam, v. 29, p. s9 – s16, 2011. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.008>. Acesso em: 09 ago. 2020.

BATTY, M. **The New Science of Cities**. Londres: MIT Press, 2013.

BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal Cities**. Londres: Academic Press Inc., 1994. *E-book*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/30867789_Fractal_Cities_-_A_Geometry_of_Form_and_Function>. Acesso em: 14 jun. 2020.

BATTY, M.; MARSHALL, S. The Origins of Complexity Theory in Cities and Planning. *In*: PORTUGALI, J. *et al.* (org.). **Complexity Theories of Cities Have Come of Age: An Overview with Implications to Urban Planning and Design**. Londres: Springer, 2012. p. 21–45. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24544-2>. Acesso em: 28 ago. 2020.

BELL, D.; JAYNE, M. Small cities? Towards a research agenda. **International Journal of Urban and Regional Research**, Blackwell, v. 33, n. 3, p. 683–699, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2009.00886.x>. Acesso em: 13 ago. 2020.

BETTENCOURT, L. Cidades como sistemas complexos. *In*: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLI, M. H. (org.). **Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas**. Brasília: IPEA, 2015. p. 436. *E-book*. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/150727_livro_modelagem_sistemas.pdf. Acesso em: 12 nov 2019.

BONAFONI, S.; BALDINELLI, G.; VERDUCCI, P. Sustainable strategies for smart cities: analysis of the town development effect on surface urban heat island through remote sensing methodologies. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 29, p. 211–218, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.11.005>. Acesso em: 19 ago. 2020.

BOUCHEFRY, K. E. L.; SOUZA, R. S. D. E. Learning in Big Data: Introduction to Machine Learning. *In*: ŠKODA, P.; ADAM, F. (org.). **Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation**. St. Louis: Elsevier Inc., 2020. p. 225–249. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00023-0>. Acesso em: 24 ago. 2020.

BRANCO, M. C.; ALCÂNTARA, F. A.. Hortas urbanas e periurbanas: o que nos diz a literatura brasileira? **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 421–428, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000300028>. Acesso em: 03 maio 2021.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Estatuto da cidade**, Brasília, 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm. Acesso em: 01 ago. 2020.

BRASIL. **Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006**. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Brasília, 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/11326.htm. Acesso em: 07 jan. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.527, de 18 de novembro de 2011**. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal; altera a Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990; revoga a Lei nº 11.111, de 5 de maio de 2005, e dispositivos da Lei nº 8.159, de 8 de janeiro de 1991; e dá outras providências. Brasília, 2011. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112527.htm Acesso em: 08 jan. 2020.

BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. **Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD)**. Brasília, 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113709.htm. Acesso em: 08 jan. 2020.

BRASIL. **Plataforma AdaptaBrasil MCTI**: banco de dados. 2020b. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre>. Acesso em: 17 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Economia. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portaria nº PR-268, de 26 de agosto de 2021. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 163, p. 60, 27 ago. 2021. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-pr-268-de-26-de-agosto-de-2021-341037196>>. Acesso em: 14 maio 2021.

BUSATO, F.; LAZZARIN, R. M.; NORO, M. Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 10, p. 251–258, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.05.001>. Acesso em: 17 ago. 2020.

CALIŃSKI, T.; HARABASZ, J. A Dendrite Method For Cluster Analysis. **Communications in Statistics**, London, v. 3, n. 1, p. 1–27, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03610927408827101>. Acesso em: 02 dez. 2021.

CÂMARA, G. Análise espacial: além dos mapas coloridos. **Revista Infogeo**, Curitiba, n. 8, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/infogeo/infogeo8.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.

CÂMARA, G.; CORREA, V. Análise espacial de áreas. In: DRUCK, S. *et al.* (org.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CANETTIERI, T.; PEREIRA, T.; LIBERATO, R. de C. Revisão sobre o conceito de segregação urbana: o componente espacial da exclusão. **Chão Urbano**, Rio de Janeiro, v. XIV, n. 4, p. 3–32, 2014. Disponível em: <http://www.chaourbano.com.br/visualizarArtigo.php?id=79>. Acesso em: 12 abr. 2021.

CARDOSO, R. dos S. *et al.* Assessment of urban heat Islands in small- and mid-sized cities in Brazil. **Climate**, Basel, v. 5, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli5010014>. Acesso em: 17 ago. 2020.

CHAMBERLIN, S. **The Transition Timeline: for a local, resilient future**. 1. ed. Cambridge: Green Books, 2009. *E-book*.

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**, Nova York, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>. Acesso em: 17 ago. 2020.

CHELLERI, L. *et al.* Resilience trade-offs: addressing multiple scales and temporal aspects of urban resilience. **Environment and Urbanization**, Londres, v. 27, n. 1, p. 181–198, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0956247814550780>. Acesso em: 14 maio 2021.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1. ed. São Paulo: Editora

Blucher, 2001.

CHRYSOULAKISA, N. *et al.* A bottom-up approach to urban metabolism: the perspective of BRIDGE. **Landscape and Urban Planning**, Nova York, v. 112, p. 100–117, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.005>. Acesso em: 17 maio 2021.

CODEVARC, Conselho Regional de Desenvolvimento do Vale do Caí. **Planejamento Estratégico Regional do Vale do Caí**. São Sebastião do Cai: Gráfica Dominó Ltda, 2010. *E-book*. Disponível em: [http://www2.al.rs.gov.br/forumdemocratico/LinkClick.aspx?fileticket=3lQoKNPAIy4%3D&t](http://www2.al.rs.gov.br/forumdemocratico/LinkClick.aspx?fileticket=3lQoKNPAIy4%3D&tabid=5363&mid=7972) abid=5363&mid=7972. Acesso em: 16 nov. 2019.

CODEVARC, Conselho Regional de Desenvolvimento do Vale do Caí. **Plano Estratégico Participativo de Desenvolvimento Regional (PEDR): 2015- 2030 / COREDE Vale do Caí**. Lajeado: UNIVATES, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201710/09144414-plano-sintesers.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2019.

COLLIER, M. J. *et al.* Transitioning to resilience and sustainability in urban communities. **Cities**, Amsterdam, v. 32, p. S21–S28, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.03.010>. Acesso em: 18 ago. 2020.

CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation**. Versão 5.3.2.1. 2021. Disponível em: <https://media.readthedocs.org/pdf/semiautomaticclassificationmanual-v4/latest/semiautomaticclassificationmanual-v4.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2022.

DAMÁSIO, C.; MACHADO, G. **Plano Diretor Participativo: uma leitura da realidade**. Feliz: [s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.feliz.rs.gov.br/web/imgs/arquivos/leitura-da-realidade-244-mb.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

DESOUZA, K. C.; FLANERY, T. H. Designing, planning, and managing resilient cities: A conceptual framework. **Cities**, Amsterdam, v. 35, p. 89–99, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.06.003>. Acesso em: 22 ago. 2020.

DUANY, A.; SPECK, J.; LYDON, M. **The Smart Growth Manual**. Miami: DPZ, 2009.

ENGIN, Z. *et al.* Data-driven urban management: Mapping the landscape. **Journal of Urban Management**, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 140–150, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.12.001>. Acesso em: 29 ago. 2020.

ERCOLE, L. A. dos S. **Sistema Modular de Gestão de Águas Residuárias Domiciliares: uma opção mais sustentável para a gestão de resíduos líquidos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FARR, D. **Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Indicador Social de Desenvolvimento dos Municípios – ISDM**. Sumário Executivo. São Paulo: FGV, 2012. Disponível em: [https://cmicro.fgv.br/sites/cmicro.fgv.br/files/file/Sum%C3%A1rio%20Executivo\(1\).pdf](https://cmicro.fgv.br/sites/cmicro.fgv.br/files/file/Sum%C3%A1rio%20Executivo(1).pdf). Acesso em: 23 nov. de 2020.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

FOOD 2030 EXPERT GROUP. Recipe for change: an agenda for a climate-smart and sustainable food system for a healthy Europe. **Report of the FOOD 2030 Expert Group Directorate-General for Research and Innovation**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2777/8407>. Acesso em: 01 ago. 2020.

FORSTER, T. *et al.* Strengthening urban-rural linkages through city-region food systems. **Regional Development Dialogue**, Nagoya, v. 35, p. 121–137, 2014. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/horticulture/crfs/Strengthening_Urban_Rural_Linkages_through_CRFS.pdf. Acesso em: 03 mar. de 2020.

FOUCAULT, M. De espaços outros. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 27, n. 79, p. 113–122, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000300008>. Acesso em: 08 set. 2021.

GAGNO, L.; NÉLSON, A.; PINTO, N. Incorporating public transport in a methodology for assessing resilience in urban mobility. **Transportation Research Part D**, Nova York, v. 85, p. 102386, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102386>. Acesso em: 17 ago. 2020.

GAMON, J. A.; PENUELAS, J.; FIELD, C. B. A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 41, p. 35–44, 1992. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S). Acesso em: 22 jul. 2021.

GENOVEZ, P. C. **Território e Desigualdades: Análise Espacial Intra-Urbana no Estudo da Dinâmica de Exclusão/Inclusão Social no Espaço Urbano em São José dos Campos – SP**. 2002. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

GETIS, A.; ORD, J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. **Geographical Analysis**, Columbus, v. 24, n. 3, p. 189–206, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>. Acesso em: 17 ago. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas Ltda, 2017.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology: The ecology of sustainable food systems**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015. *E-book*.

GUERREIRO, M. R. Interstícios urbanos e o conceito de espaço exterior positivo. **Forum Sociológico**, Lisboa, n. 18, p. 13–19, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/sociologico.218>. Acesso em: 17 ago. 2020.

HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. **IEEE Transactions on Neural Networks**, Nova York, v. 5, n. 6, p. 989–993, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/72.329697>. Acesso em: 12 fev. 2022.

HARRIS, N. L. *et al.* Using spatial statistics to identify emerging hot spots of forest loss. **Environmental Research Letters**, Londres, v. 12, n. 2, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5a2f>. Acesso em: 15 set. 2021.

HIRSCH, D. D. The Glass House Effect: Big Data, The New Oil, and the Power of Analogy. **Maine Law Review**, Portland, v. 66, n. 2, 2014. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2393792. Acesso em: 17 ago. 2020.

HOPKINS, R. **The Transition Handbook: From Oil Dependency to Local Resilience**. 1. ed. Cambridge: UIT Cambridge Ltd., 2014. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=_kKqngEACAAJ. Acesso em: 14 maio de 2020.

HU, C. B. *et al.* Classification and mapping of urban canyon geometry using Google Street View images and deep multitask learning. **Building and Environment**, Nova York, v. 167, p. 106424, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106424>. Acesso em: 19 ago. 2020.

HUANG, W.; LING, M. System resilience assessment method of urban lifeline system for GIS. **Computers, Environment and Urban Systems**, Nova York, v. 71, n. March 2017, p. 67–80, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.04.003>. Acesso em: 18 ago. 2020.

IBGE. **Censo Demográfico Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IBGE. **Regiões de influência das cidades**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

IBGE. **Pesquisa de orçamentos familiares 2017-2018: avaliação nutricional da disponibilidade domiciliar de alimentos no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020a. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101704.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2020.

JACOBS, J. **The death and life of great American cities**. Nova York: Random House, 1992.

JENKS, F. G. The Data Model Concept in Statistical Mapping. **International Yearbook of Cartography**, Gütersloh, v. 7, p. 186–190, 1967. Disponível em: <http://ci.nii.ac.jp/naid/10021899676/en>. Acesso em: 15 out. 2020.

JIANG, B. A City Is a Complex Network. In: MEHAFFY, M. W. **Christopher Alexander. A City is Not a Tree: 50th Anniversary Edition**. Portland: Sustasis Press, 2015 a. *E-book*. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1509.08452>. Acesso em: 17 set. 2019.

JIANG, B. Wholeness as a hierarchical graph to capture the nature of space. **International Journal of Geographical Information Science**, Londres, v. 29, n. 9, p. 1632–1648, 2015 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1038542>. Acesso em: 17 de ago. 2020.

JIANG, B. Living Structure Down to Earth and Up to Heaven: Christopher Alexander. **Urban Science**, Basel, v. 3, n. 3, p. 96, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/urbansci3030096>. Acesso em: 16 ago. 2020.

JIANG, B.; REN, Z. Geographic space as a living structure for predicting human activities using big data. **International Journal of Geographical Information Science**, Londres, v. 33, n. 4, p. 764–779, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1427754>. Acesso em: 16 ago. 2020.

JIANG, B.; YAO, X. **Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics**. Londres: Springer, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/9789048185726>. Acesso em: 16 ago. 2020.

KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. **Journal of the Royal Statistical Society. Serie A**, Londres, v. 114, pp. 99-100, 1951. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2980903>. Acesso em: 17 set. 2021.

KUHN, D. **Análise multidimensional dos padrões urbanos do espaço público: o caso da cidade de Feliz, RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

KUHN, E. A. **Metabolismo de um município brasileiro de pequeno porte: o caso de Feliz, RS**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

KUZNECOVA, T.; ROMAGNOLI, F.; ROCHAS, C. Energy Metabolism for Resilient Urban Environment: A Methodological Approach. **Procedia Economics and Finance**, Amsterdam, v. 18, p. 780–788, 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)01002-8](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)01002-8). Acesso em: 19 ago. 2020.

LAGRO, J. Assessing patch shape in landscape mosaics. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Baton Rouge, v. 57, n. 3, p. 285–293, 1991.

- LANDAU, E. C. *et al.* **Variação Geográfica do Tamanho dos Módulos Fiscais no Brasil**. 1. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5700/rausp1110>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- LAWRENCE, R. J. Housing and health: From interdisciplinary principles to transdisciplinary research and practice. **Futures**, Londres, v. 36, n. 4, p. 487–502, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2003.10.001>. Acesso em: 14 maio 2021.
- LEFEBVRE, H. **O direito à cidade**. 5. ed. São Paulo: Centauro, 2008.
- LEÓN, J.; MARCH, A. Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: A case study of Talcahuano, Chile. **Habitat International**, Vancouver, v. 43, p. 250–262, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.006>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- LI, G. *et al.* System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China. **Resources, Conservation & Recycling**, Amsterdam, v. 161, n. 104954, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104954>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- LI, Y.; KAPPAS, M.; LI, Y. Exploring the coastal urban resilience and transformation of coupled human-environment systems. **Journal of Cleaner Production**, Nova York, v. 195, p. 1505–1511, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.227>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- LING, T.; CHIANG, Y. Strengthening the resilience of urban retailers towards flood risks – A case study in the riverbank region of Kaohsiung City. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 27, n. December 2017, p. 541–555, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.11.020>
- LOVELOCK, J. **Gaia: A New Look at Life on Earth**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- LOVELOCK, J. **Gaia: Alerta Final**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Intrínseca, 2020. *E-book*.
- LUTZENBERGER, J. **Garimpo ou gestão: crítica ecológica ao pensamento econômico**. Porto Alegre: Pelo Planeta Associados, 2009.
- LUTZENBERGER, J. A. **Fim do futuro?: manifesto ecológico brasileiro**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Movimento, 1976.
- LYNCH, K. **A Theory of Good City Form**. Cambridge, Massachusetts and Longon, England: MIT Press, 1982.

MANN, H. B. Non-Parametric Test Against Trend. **Econometrica**, Chicago, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1907187>. Acesso em: 17 set. 2021.

MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S.; ENE, E. **FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps**. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Versão 4.2. Portland: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>. Acesso em: 05 jul. 2021.

MCHARG, I. L. **Design with Nature**. 1. ed. Nova York: American Museum of Natural History, 1969.

MEADOWS, D. H.; WRIGHT, D. **Thinking in Systems: A Primer**. 1 ed. Hartford: Chelsea Green Pub., 2008. E-book.

METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, São Paulo, v. 1, n. 1–2, p. 1–9, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1676-06032001000100006>. Acesso em: 05 ago. 2021.

MILES, V.; ESAU, I. Surface urban heat islands in 57 cities across different climates in northern Fennoscandia. **Urban Climate**, Amsterdam, v. 31, n. August 2019, p. 100575, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100575>. Acesso em: 17 ago. 2020.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 02 nov. 2019.

MOLLISON, B.; SLAY, R. M. **Introdução à Permacultura**. 1 ed. Brasília: MA/SDR/PNFC, 1998.

MORAES, F. D. de; CUNHA, L. F. (Org.). **Genealogia dos municípios do Rio Grande do Sul / Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão (SPGG), 2018. *E-book*.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. 4. ed. Porto Alegre: Sulina, 2005.

MORIN, E. **A Via para o futuro da humanidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.

MOSCHETTA, G. G. **Abordagem para o lançamento de uma Paisagem Urbana Produtiva Contínua em um município brasileiro de pequeno porte**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MOSTAFAVI, N.; FARZINMOGHADAM, M.; HOQUE, S. Urban residential energy consumption modeling in the Integrated Urban Metabolism Analysis Tool (IUMAT).

Building and Environment, Nova York, v. 114, p. 429–444, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.035>. Acesso em: 17 ago. 2020.

NAGIB, G.; NAKAMURA, A. C. Urban agriculture in the city of São Paulo: New spatial transformations and ongoing challenges to guarantee the production and consumption of healthy food. **Global Food Security**, Amsterdam, v. 26, n. April, p. 100378, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100378>. Acesso em: 03 ago. 2020.

NEWMAN, P.; JENNINGS, I. **Cities as Sustainable Ecosystems: Principles and Practices**. Washington, D.C: Island Press, 2008. *E-book*.

NHUT, P.; CHAPMAN, L.; TIGHT, M. Resilient transport systems to reduce urban vulnerability to floods in emerging-coastal cities: A case study of Ho Chi Minh City, Vietnam. **Travel Behaviour and Society**, Amsterdam, v. 15, n. April 2019, p. 28–43, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2018.11.001>. Acesso em: 17 ago. 2020.

NILSSON, N. J. **The Quest for Artificial Intelligence: a History of Ideas and Achievements**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, Londres, v. 4, n. 3, p. 313–332, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>. Acesso em: 12 abr. 2020.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Objetivos do desenvolvimento sustentável**. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>. Acesso em: 12 jul. 2020.

OSMAN, A. M. S. A novel big data analytics framework for smart cities. **Future Generation Computer Systems**, Amsterdam, v. 91, p. 620–633, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.06.046>. Acesso em: 18 ago. 2020.

OSTROM, E. Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. **Global Environmental Change**, Nova York, v. 20, n. 4, p. 550–557, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.004>. Acesso em: 14 maio 2021.

PAIM, A. B. H. **A agricultura urbana e as suas contribuições para a segurança alimentar e o desenvolvimento mais sustentável das pequenas municipalidades Estudo de caso: hortas domésticas no Município de Feliz, RS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2014.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2016. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PESCI, R.; MENEGAT, R. **Diez Ideas Fundantes: de Galilo a Gaia.** La Plata: Fundación CEPA, 2014. *E-book*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346681602_Diez_Ideas_Fundantes_De_GALILEO_a_GAIA. Acesso em: 08 de out. 2022.

PORTO ALEGRE, Prefeitura Municipal. **Mapas da inclusão e exclusão social de Porto Alegre.** Porto Alegre: Prefeitura Municipal de Porto Alegre / Gabinete do Prefeito / Secretaria do Planejamento Municipal, 2004.

PORTO, M. L.; MENEGAT, R. Ecologia de paisagem: Um novo enfoque na gestão dos sistemas da terra e do homem. *In*: MENEGAT, R; ALMEIDA, G. (org.). **Desenvolvimento sustentável e gestão ambiental nas cidades.** Porto Alegre: Edufrgs, 2004. pp. 361-376.

PORTUGALI, J. Learning from paradoxes about prediction and planning in self-organizing cities. **Planning Theory**, Abingdon, v. 7, n. 3, p. 248–262, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1473095208094823>. Acesso em: 14 maio 2021.

RAHMAN, A. *et al.* Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. *In*: AVIRIS Workshop, JPL/NASA, 2000, Pasadena. **Proceedings** [...]. Disponível em: https://aviris.jpl.nasa.gov/proceedings/workshops/00_docs/Rahman_web.pdf. Acesso em: 22 jul. 2021.

RAMADIER, T. Transdisciplinarity and its challenges: The case of urban studies. **Futures**, Cedar Falls, v. 36, n. 4, p. 423–439, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2003.10.009>. Acesso em: 17 ago. 2020.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 8.456, de 8 de dezembro de 1987.** Cria o Município de Capela de Santana. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, [1987]. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/08.456.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2020.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 9.613, de 20 de março de 1992.** Cria o município de São Pedro da Serra. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, [1992]. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/FileRepository/repLegisComp/Lei%20n%C2%BA%2009.613.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2020.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 10.283, de 17 de outubro de 1994.** Dispõe sobre a criação, estruturação e funcionamento dos Conselhos Regionais de Desenvolvimento e dá outras providências. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, [1994]. Disponível em: http://www.al.rs.gov.br/Legis/M010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXT0&Hid_TodasNormas=12666&hTexto=&Hid_IDNorma=12666. Acesso em: abr. 2020.

RIZZO, A.; GALANAKIS, M. Transdisciplinary Urbanism: Three experiences from Europe and Canada. **Cities**, Amsterdam, v. 47, p. 35–44, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.01.001>. Acesso em: 17 ago. 2020.

ROUSE, J. *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In: Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium*, 3, 1973, Washington. DC, USA. **Proceedings** [...]. Washington: NASA, 1973. p. 10–14.

SALINGAROS, N. A. Theory of the urban web. **Journal of Urban Design**, Londresm, v. 3, n. 1, p. 53–71, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13574809808724416>. Acesso em: 14 maio 2021.

SAMUEL, P. R. da S. **Alternativas Sustentáveis de Tratamento de Esgotos Sanitários Urbanos, Através de Sistemas Descentralizados, para Municípios de Pequeno Porte**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SAMUELSSON, K.; COLDING, J.; BARTHEL, S. Urban resilience at eye level: Spatial analysis of empirically defined experiential landscapes. **Landscape and Urban Planning**, Nova York, v. 187, n. November 2018, p. 70–80, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.03.015>. Acesso em: 19 ago. 2020.

SATTLER, M. A. **Habitações de baixo custo mais sustentáveis: a Casa Alvorada e o Centro Experimental de Tecnologias Habitacionais Sustentáveis**. 1 ed. Porto Alegre: ANTAC, 2007. (Coleção Habitar, 8). *E-book*. Disponível em: <http://habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivos/colecao9/primeiras.pdf>. Acesso em: 14 nov 2019.

SCHÄF, A.; SWILLING, M. Valuing green infrastructure in an urban environment under pressure – The Johannesburg case. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 86, p. 246–257, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.05.008>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **1ª Etapa do Plano de Bacia do Rio Caí: Relatório Síntese das Etapas A e B do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Porto Alegre/RS: SEMA, 2008.

SERRE, D.; HEINZLEF, C. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 30, n. October 2017, p. 235–243, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.02.018>. Acesso em: 09 out. 2022.

SHEN, L. *et al.* A new method to evaluate urban resources environment carrying capacity from the load-and-carrier perspective. **Resources, Conservation & Recycling**, Amsterdam, v. 154, n. December 2019, p. 104616, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104616>. Acesso em: 17 ago. 2020.

SILVA, A. *et al.* Soluções Urbanas Sustentáveis: Avaliação Integrada do Abastecimento de Água e Tratamento de Esgoto. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 3, n. 2, p. 67–78, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n2.67-78>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVA, A. ; SATTLER, M. Indicadores de sustentabilidade urbana no município de Penedo, Alagoas. *In: Congresso Internacional de Sustentabilidade Urbana - 14ª Jornada URBENERE e 2ª Jornada CIRES. Anais... v. II, n. 5, p. 1267–1274, 2018.*

SILVA, A; SATTLER, M. Análise multivariada como suporte à definição de estratégias para produção hortícola urbana. *In: Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Anais..., v. IX, n. 3, p. 224–235, 2021.*

SILVA, A.; TORRES, M. C. A. Proposing an effective and inexpensive tool to detect urban surface temperature changes associated with urbanization processes in small cities. **Building and Environment**, Nova York, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107634>. Acesso em: 14 maio 2020.

SILVA, J. S.; SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G. Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil. **Building and Environment**, Nova York, v. 136, n. January, p. 279–292, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.041>. Acesso em: 12 ago. 2020.

SOJA, E. W. The City and Spatial Justice. *In: Conference Spatial Justice, 2009, Paris. Anais [...]. Paris: Presses universitaires de Paris Nanterre, 2010. p. 1-5.* Disponível em: <https://doi.org/10.4000/books.pupo.415>. Acesso em: 14 maio 2021.

SOLÀ-MORALES, I. **Territorios**. 1 ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2002.

SOMMEN, F. J. Van Der; PEARSON, D. M. Analysis of the interrelationship between houses, trees and damage in a cyclone affected city: Can landscape design and planning utilising trees minimise cyclone impact? **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 28, n. February, p. 701–710, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.01.031>. Acesso em: 17 ago. 2020.

SOUZA, D. T. P. **Corredores Verdes : Uma Abordagem para o seu Planejamento em Municípios Brasileiros de Pequeno Porte**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOUZA, C. H. C. de. **Proposta de método para avaliação da sustentabilidade ambiental de pequenos municípios**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

SOUZA, I. M. **Sensoriamento Remoto Orbital Aplicado a Estudos Urbanos**. São José dos Campos: INPE, 2012 b. *E-book*. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BEFCJH>.

Acesso em: 21 jul. 2021.

SPOSATI, A. Território e gestão de políticas sociais. **Serviço Social em Revista**, Londrina, v. 16, n. 1, p. 5-18, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-4842.2013v16n1p05>. Acesso em: 02 ago. 2020.

SPOSATI, A. **Mapa da exclusão/inclusão social na cidade de São Paulo**. São Paulo: Educ: 1996.

THAYER, R. L.: **Bioregional Thought and Practice**, Berkeley: University of California Press, 2003.

TODESCHINI, M. O Vale da Felicidade. **Revista Veja**, edição 2029, n. 40, 10 out. 2007.

USGS – United States Geological Survey. **LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook**. Sioux Falls: USGS, 2019. v. 4. *E-book*. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>>. Acesso em: 30 nov 2019.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 89, n. 4, p. 467–483, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>. Acesso em: 22 fev. 2022.

WILKINSON, C. Social-ecological resilience: Insights and issues for planning theory. **Planning Theory**, Abingdon, v. 11, n. 2, p. 148 –169, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1473095211426274>. Acesso em: 12 abr. 2021.

XIA, C. *et al.* Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism and its response to change of urban size: A case of the Yangtze River Delta, China. **Ecological Indicators**, Shannon, v. 104, n. May, p. 615–625, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.031>. Acesso em: 23 jul. 2020.

XU, W.; ZHONG, M. Enhancing community resilience to urban floods with a network structuring model. **Safety Science**, Nova York, v. 127, p. 104699, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104699>. Acesso em: 15 ago. 2020.

XUE, F. *et al.* A derivative-free optimization-based approach for detecting architectural symmetries from 3D point clouds. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 148, n. July 2018, p. 32–40, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.005>. Acesso em: 19 jul. 2020.

YANG, Q.; HUANG, X.; TANG, Q. The footprint of urban heat island effect in 302 Chinese cities: Temporal trends and associated factors. **Science of the Total Environment**, Nova York, v. 655, p. 652–662, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.171>. Acesso em: 22 jul. 2020.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZARDO, L. *et al.* Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. **Ecosystem Services**, Amsterdam, v. 26, p. 225–235, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>. Acesso em: 23 jul. 2020.

ZARE, N.; TALEBBEYDOKHTI, N. Policies and governance impact maps of floods on metropolitan Shiraz (the first step toward resilience modeling of the city). **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 28, n. March, p. 298–317, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.03.003>. Acesso em: 22 jul. 2020.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 24, n. 3, p. 583–594, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>. Acesso em: 02 ago. 2020.

ZHOU, X. Spatial explicit management for the water sustainability of coupled human and natural systems. **Environmental Pollution**, Dordrecht, v. 251, p. 292–301, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.020>. Acesso em: 23 jul. 2020.

**APÊNDICE A - Variáveis Utilizadas no Cálculo dos Índices Componentes
do IEX**

Planilha do Censo 2010	Variável	Descrição	Identificação
ResponsavelRenda_RS	V010	Pessoas responsáveis, sem rendimento nominal mensal	$Renda_0$
	V001	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de até 1/2 salário mínimo	$Renda_{<0,5}$
	V002	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de 1/2 a 1 salário mínimo	$Renda_{0,5a1}$
	V005	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de 3 a 5 salários mínimos	$Renda_{3a5}$
	V006	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de 5 a 10 salários mínimos	$Renda_{5a10}$
	V007	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de 10 a 15 salários mínimos	$Renda_{10a15}$
	V008	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de 15 a 20 salários mínimos	$Renda_{15a}$
	V009	Pessoas responsáveis, com rendimento nominal mensal de 20 salários mínimos	$Renda_{>20}$
	V042	Pessoas responsáveis, com ou sem rendimento, do sexo masculino	$RespHomens$
	V044	Total do rendimento nominal mensal das pessoas responsáveis, do sexo masculino	$RendaRespHomens$
	V064	Pessoas responsáveis, com ou sem rendimento, do sexo feminino	$RespMulheres$
	V066	Total do rendimento nominal mensal das pessoas responsáveis, do sexo feminino	$RendaRespMulheres$
	Basico_RS	V003	Média do número de moradores em domicílios particulares permanentes
Domicilio01_RS	V002	Domicílios particulares permanentes	$TotalDomicílios$
	V012	Domicílios particulares permanentes, com abastecimento de água da rede geral	$Água_{Rede}$
	V013	Domicílios particulares permanentes, com abastecimento de água de poço ou nascente na propriedade	$Água_{Poço/Nascente}$
	V014	Domicílios particulares permanentes, com abastecimento de água da chuva, armazenada em cisterna	$Água_{pluvial}$
	V017	Domicílios particulares permanentes: com banheiro de uso exclusivo dos moradores, ou sanitário e esgotamento sanitário, via rede geral de esgoto ou pluvial	$Esgoto_{Rede}$
	V018	Domicílios particulares permanentes: com banheiro de uso exclusivo dos moradores, ou sanitário e esgotamento sanitário, via fossa séptica	$Esgoto_{FossaSéptica}$
	V034	Domicílios particulares permanentes: sem banheiro de uso exclusivo dos moradores	$SemBanheiros$

	V035	Domicílios particulares permanentes com lixo coletado	<i>ColetaResíduos</i>
Domicilio02_RS	V045	Homens moradores em domicílios particulares e domicílios coletivos	<i>TotalHomens</i>
	V089	Mulheres moradoras em domicílios particulares e domicílios coletivos	<i>TotalMulheres</i>
DomicilioRenda_RS	V001	Total de domicílios particulares improvisados	<i>MorImprov</i>
Pessoa01_RS	V002	Pessoas alfabetizadas, com 5 anos de idade	<i>PessAlfa_{5anos}</i>
	V003	Pessoas alfabetizadas, com 6 anos de idade	<i>PessAlfa_{6anos}</i>
	V004	Pessoas alfabetizadas, com 7 anos de idade	<i>PessAlfa_{7anos}</i>
	V005	Pessoas alfabetizadas, com 8 anos de idade	<i>PessAlfa_{8anos}</i>
	V006	Pessoas alfabetizadas, com 9 anos de idade	<i>PessAlfa_{9anos}</i>
	V007	Pessoas alfabetizadas, com 10 anos de idade	<i>PessAlfa_{10anos}</i>
	V008	Pessoas alfabetizadas, com 11 anos de idade	<i>PessAlfa_{11anos}</i>
	V009	Pessoas alfabetizadas, com 12 anos de idade	<i>PessAlfa_{12anos}</i>
	V010	Pessoas alfabetizadas, com 13 anos de idade	<i>PessAlfa_{13anos}</i>
	V011	Pessoas alfabetizadas, com 14 anos de idade	<i>PessAlfa_{14anos}</i>
Pessoa02_RS	V086	Homens alfabetizados, com 5, ou mais, anos de idade	<i>HomensAlfa</i>
	V171	Mulheres alfabetizadas, com 5, ou mais, anos de idade	<i>MulheresAlfa</i>
Pessoa13_RS	V001	Pessoas residentes em domicílios particulares e domicílios coletivos	<i>TotalPessoas</i>
	V039	Pessoas com 5 anos de idade	<i>Pess_{5anos}</i>
	V040	Pessoas com 6 anos de idade	<i>Pess_{6anos}</i>
	V041	Pessoas com 7 anos de idade	<i>Pess_{7anos}</i>
	V042	Pessoas com 8 anos de idade	<i>Pess_{8anos}</i>
	V043	Pessoas com 9 anos de idade	<i>Pess_{9anos}</i>
	V044	Pessoas com 10 anos de idade	<i>Pess_{10anos}</i>
	V045	Pessoas com 11 anos de idade	<i>Pess_{11anos}</i>
	V046	Pessoas com 12 anos de idade	<i>Pess_{12anos}</i>
	V047	Pessoas com 13 anos de idade	<i>Pess_{13anos}</i>
	V048	Pessoas com 14 anos de idade	<i>Pess_{14anos}</i>
	V104	Pessoas com 70 anos de idade	<i>Pess_{70anos}</i>
	V105	Pessoas com 71 anos de idade	<i>Pess_{71anos}</i>
	V106	Pessoas com 72 anos de idade	<i>Pess_{72anos}</i>
	V107	Pessoas com 73 anos de idade	<i>Pess_{73anos}</i>
	V108	Pessoas com 74 anos de idade	<i>Pess_{74anos}</i>
	V109	Pessoas com 75 anos de idade	<i>Pess_{75anos}</i>
	V110	Pessoas com 76 anos de idade	<i>Pess_{76anos}</i>
V111	Pessoas com 77 anos de idade	<i>Pess_{77anos}</i>	

	V112	Pessoas com 78 anos de idade	<i>Pess_{78anos}</i>
	V113	Pessoas com 79 anos de idade	<i>Pess_{79anos}</i>
	V114	Pessoas com 80 anos de idade	<i>Pess_{80anos}</i>
	V115	Pessoas com 81 anos de idade	<i>Pess_{81anos}</i>
	V116	Pessoas com 82 anos de idade	<i>Pess_{82anos}</i>
	V117	Pessoas com 83 anos de idade	<i>Pess_{83anos}</i>
	V118	Pessoas com 84 anos de idade	<i>Pess_{84anos}</i>
	V119	Pessoas com 85 anos de idade	<i>Pess_{85anos}</i>
	V120	Pessoas com 86 anos de idade	<i>Pess_{86anos}</i>
	V121	Pessoas com 87 anos de idade	<i>Pess_{87anos}</i>
	V122	Pessoas com 88 anos de idade	<i>Pess_{88anos}</i>
	V123	Pessoas com 89 anos de idade	<i>Pess_{89anos}</i>
	V124	Pessoas com 90 anos de idade	<i>Pess_{90anos}</i>
	V125	Pessoas com 91 anos de idade	<i>Pess_{91anos}</i>
	V126	Pessoas com 92 anos de idade	<i>Pess_{92anos}</i>
	V127	Pessoas com 93 anos de idade	<i>Pess_{93anos}</i>
	V128	Pessoas com 94 anos de idade	<i>Pess_{94anos}</i>
	V129	Pessoas com 95 anos de idade	<i>Pess_{95anos}</i>
	V130	Pessoas com 96 anos de idade	<i>Pess_{96anos}</i>
	V131	Pessoas com 97 anos de idade	<i>Pess_{97anos}</i>
	V132	Pessoas com 98 anos de idade	<i>Pess_{98anos}</i>
	V133	Pessoas com 99 anos de idade	<i>Pess_{99anos}</i>
	V134	Pessoas com 100 anos, ou mais, de idade	<i>Pess_{≥100anos}</i>
Responsável02_UF	V001	Pessoas Responsáveis	<i>TotalResp</i>
	V093	Pessoas Responsáveis alfabetizados	<i>RespAlfa</i>