

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE
E CONSERVAÇÃO DA NATUREZA**

Ana Paula Bax

Conectividade Estrutural da Paisagem: a modelagem de Bioenergia como instrumento para a conservação ambiental e o planejamento territorial em regiões neotropicais

Juiz de Fora

2023

Ana Paula Bax

Conectividade Estrutural da Paisagem: a modelagem de Bioenergia como instrumento para a conservação ambiental e o planejamento territorial em regiões neotropicais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Biodiversidade e Conservação da Natureza, Área de Concentração: Comportamento, Ecologia e Sistemática.

Orientador: Prof. Dr. Nathan Oliveira Barros
Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Alvim Carvalho

Juiz de Fora
2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Bax, Ana Paula.

Conectividade Estrutural da Paisagem : a modelagem de bioenergia como instrumento para a conservação ambiental e o planejamento territorial em regiões neotropicais / Ana Paula Bax. -- 2023.

118 p. : il.

Orientador: Nathan Oliveira Barros

Coorientador: Fabrício Alvim Carvalho

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza, 2023.

1. Indicador Ecológico. 2. Modelagem da conectividade da paisagem. 3. PANDORA. 4. Termodinâmica. 5. Grafos. I. Oliveira Barros, Nathan, orient. II. Alvim Carvalho, Fabrício, coorient. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA NATUREZA

Nº PROPP:80.27022023.46-M

Nº PPG: 509

Ata da sessão pública referente à defesa da () **dissertação** () **tese** intitulada **Conectividade Estrutural da Paisagem: a modelagem de Bioenergia como instrumento para a conservação ambiental e o planejamento territorial em regiões neotropicais, para fins de obtenção do título de ()mestre(a) ()doutor(a) em Biodiversidade e Conservação da Natureza**, área de concentração **Comportamento, Ecologia e Sistemática**, pelo(a) discente **Ana Paula Bax** (matrícula **102520033** - início do curso em **13 / 03 /2019**), sob orientação do(a) Prof.^(a)Dr^(a) **Nathan Oliveira Barros** e coorientação do(a) Prof.^(a)Dr^(a) **Fabrício Alvin Carvalho**.

Aos **27 dias** do mês de **fevereiro** do ano de **2023**, às **09:00** horas, no(a) **Auditório 2 do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza** da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), reuniu-se a Banca examinadora da () **dissertação** () **tese** em epígrafe, aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação, conforme a seguinte composição:

Titulação Prof(a) Dr(a) / Dr(a)	Nome	Na qualidade de:
Prof(a) Dr(a)	Nathan Oliveira Barros	Orientador(a) e Presidente da Banca
Prof(a) Dr(a)	Fabrício Alvin Carvalho	Coorientador(a)
Prof(a) Dr(a)	Fátima Regina Gonçalves Salimena	Membro titular interno
Dr(a)	Arthur Sérgio Mouço Valente	Membro titular externo
Prof(a) Dr(a)	André Megali Amado	Suplente interno
Dr(a)	Érica Rievers Borges	Suplente externo

***Na qualidade de (opções a serem escolhidas):**

- Membro titular interno
- Membro titular externo
- Membro titular externo e Coorientador(a)
- Orientador(a) e Presidente da Banca
- Suplente interno
- Suplente externo
- Membro titular interno e Presidente da Banca
- Orientador(a)
- Coorientador(a) e Presidente da Banca
- Coorientador(a)
- Membro titular externo (com participação remota, conforme Portaria n. 882/2022 - PROPP).



Documento assinado eletronicamente por **Camila Fonseca de Oliveira Calderano, Servidor(a)**, em 15/02/2023, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no §3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1143724** e o código CRC **C1812806**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA NATUREZA

Nº PROPP:

Nº PPG: 509

AValiação da Banca Examinadora

Tendo o(a) senhor(a) Presidente Nathan Oliveira Barros declarado aberta a sessão, mediante o prévio exame do referido trabalho por parte de cada membro da Banca, o(a) discente Ana Paula Bax procedeu à apresentação de seu Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-graduação *Stricto sensu* e foi submetido(a) à arguição pela Banca Examinadora que, em seguida, deliberou sobre o seguinte resultado:

APROVADO (Conceito A)

APROVADO CONDICIONALMENTE (Conceito B), mediante o atendimento das alterações sugeridas pela Banca Examinadora, constantes do campo Observações desta Ata.

REPROVADO (Conceito C), conforme parecer circunstanciado, registrado no campo Observações desta Ata e/ou em documento anexo, elaborado pela Banca Examinadora

Novo título da Dissertação/Tese (só preencher no caso de mudança de título):

--

Observações da Banca Examinadora caso:

- O discente foi Aprovado Condicionalmente
- Necessidade de anotações gerais sobre a dissertação/tese e sobre a defesa, as quais a banca julgue pertinentes.

A banca ocorreu de forma presencial. Todos os membros e o discente participaram da sessão de Defesa e a acompanharam na sua integralidade

Nada mais havendo a tratar, o(a) senhor(a) Presidente declarou encerrada a sessão de Defesa, sendo a presente Ata lavrada e assinada pelos(as) senhores(as) membros da Banca Examinadora e pelo(a) discente, atestando ciência do que nela consta.

INFORMAÇÕES

- Para fazer jus ao título de mestre(a)/doutor(a), a versão final da dissertação/tese, considerada Aprovada, devidamente conferida pela Secretaria do Programa de Pós-graduação, deverá ser tramitada para a PROPP, em Processo de Homologação de Dissertação/Tese, dentro do prazo de 90 dias a partir da data da defesa. Após a entrega dos dois exemplares definitivos, o processo deverá receber homologação e, então, ser encaminhado à CDARA.
- Esta Ata de Defesa é um documento padronizado pela Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa. Observações excepcionais feitas pela Banca Examinadora poderão ser registradas no campo disponível acima ou em documento anexo, desde que assinadas pelo(a) Presidente(a).
- Esta Ata de Defesa somente poderá ser utilizada como comprovante de titulação se apresentada junto à Certidão da Coordenadoria de Assuntos e Registros Acadêmicos da UFJF (CDARA) atestando que o processo de confecção e registro do diploma está em andamento.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nathan Oliveira Barros - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Fabrício Alvim Carvalho - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Fátima Regina Gonçalves Salimena
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Arthur Sérgio Mouço Valente
Instituto Estadual de Florestas

Juiz de Fora, 07 / 02 / 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Nathan Oliveira Barros, Professor(a)**, em 27/02/2023, às 13:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Sergio Mouço Valente, Usuário Externo**, em 27/02/2023, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fátima Regina Gonçalves Salimena, Usuário Externo**, em 27/02/2023, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Alvim Carvalho, Professor(a)**, em 28/02/2023, às 00:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula Bax, Servidor(a)**, em 28/02/2023, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1143866** e o código CRC **75EC93F5**.

Dedico este trabalho a meu amado filho
João Pedro. Seus olhinhos serenos são luz
na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gracias a la vida!

Neste momento, vejo o sorriso de meu pai, Fábio (*in memoriam*), meu melhor amigo, cujas mãos foram sempre apoio e esteio em minha caminhada. Obrigada pelo amor e carinho de sempre, Vô! Nos vemos no tempo sem fim.

Ao meu filho, João Pedro, que me ensina a ser mãe. Por compreender a necessidade de nos privar de tempo juntos para “ficar fazendo mapas” e me dedicar à realização deste trabalho. Te amo, Tchu!

À minha mãe, Mathilde, e à minha família, por serem o solo fértil onde crescem as saudáveis raízes dos afetos.

Em especial, ao meu irmão, Fábio, amigo de todas as horas e meu primeiro mestre da ecologia, que compartilhou comigo seus livros e conhecimentos na graduação e que, com amorosa paciência, esteve sempre disponível para me ajudar com as reflexões e dúvidas desta etapa.

Aos meus irmãos escolhidos e às suas famílias que fazem parte da minha família afetiva: Adriana Assis, Alex Labbate, Fabiana Fraga, Morgana Soares, Tânia Duarte, Renata Maldonado e, em especial, Leandro (Tutu) França. Obrigada por fazerem parte da minha vida.

Ao Professor Dr. Nathan Oliveira Barros, meu orientador, que gentilmente me acolheu e possibilitou a realização deste trabalho com sua brilhante e generosa orientação.

Ao Professor Dr. Fabrício Alvim Carvalho, meu coorientador, por suas contribuições e pelas discussões que tanto ajudaram no desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores Edson Sano e Gabrielle Pelorosso por sua solicitude e interesse em contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos docentes e colegas do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Natureza pelas excelentes aulas e por todo aprendizado.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, instituição em que me orgulho de trabalhar, pelo apoio financeiro, pelo ensino de excelência e pela oportunidade de conviver com valorosos servidores públicos, sempre dedicados a fortalecer o ensino e a pesquisa de nosso país e a formar cidadãos emancipados.

Por fim, o agradecimento essencial: ao Cristo Jesus e à nossa Mãe Santíssima, por tudo, sempre.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A natureza, em seus caprichos e mistérios, condensa em pequenas coisas, o poder de dirigir as grandes; nas sutis, a potência de dominar as mais grosseiras; nas coisas simples, a capacidade de reger as complexas.” (Ana Maria Primavesi, 1990)

RESUMO

A fragmentação da paisagem causada pelos impactos das atividades antrópicas limita o potencial de dispersão e a colonização dos ambientes por espécies vegetais e animais. A persistência dos fluxos de energia, de materiais, genético e de serviços ecossistêmicos fica comprometida e afeta a saúde dos ecossistemas e a conservação da biodiversidade. Como técnica de apoio ao desenho de estratégias de conservação, a aplicação dos grafos de paisagem possibilita a priorização conservacionista em redes ecológicas, a identificação dos melhores locais para adicionar novos elementos à rede de modo a aumentar a conectividade e estimar o impacto da implantação de infraestruturas sobre a conectividade da paisagem. Neste trabalho, o modelo PANDORA foi utilizado para avaliar a conectividade estrutural da paisagem ao quantificar e comparar o cenário bioenergético e os fluxos de bioenergia atuais com cenários alternativos, inovando ao ajustar os parâmetros do modelo à paisagem neotropical. PANDORA é baseado na Teoria dos Grafos e em conceitos termodinâmicos, equilíbrio matemático, teoria metabólica e métricas da paisagem. Paisagens com alto valor de Bioenergia de Equilíbrio são mais sustentáveis e podem evoluir para níveis de maior complexidade estrutural e funcional. Em estudo de caso do município de Juiz de Fora/MG, foram simuladas alterações na cobertura florestal das Áreas de Preservação Permanente (APPs) em áreas de mananciais e avaliadas as respostas no cenário bioenergético às mudanças propostas no uso e cobertura do solo. Constatou-se que alterações na cobertura vegetal de pequenas áreas podem afetar o cenário bioenergético de toda a paisagem. A utilização de modelos pode propiciar um suporte válido e confiável para o planejamento paisagístico e urbano.

Palavras-chave: Indicador Ecológico. Modelagem da conectividade da paisagem. PANDORA. Termodinâmica. Grafos.

ABSTRACT

Human activities fragment the landscape limiting the potential for plant and animal species to disperse and colonize environments. The persistence of flows of energy, materials, genetics, and ecosystem services is compromised and affects the health of ecosystems and the conservation of biodiversity. The use of landscape graphs as a technique to aid in the design of conservation strategies enables conservationist prioritization in ecological networks, the identification of the best places to add new elements to the network to increase connectivity, and estimates the impact of infrastructure implementation on landscape connectivity. In this study, the PANDORA model was used to measure the structural connectivity of a landscape by calculating and comparing the current bioenergetic scenario and bioenergy fluxes with hypothetical scenarios, innovating by adjusting the model parameters to the neotropical landscape. PANDORA is based on Graph Theory, thermodynamic concepts, mathematical equilibrium, metabolic theory, and landscape metrics. High equilibrium bioenergy values in landscapes make them more resilient and allow them to develop to higher levels of structural and functional complexity. In a case study in the city of Juiz de Fora, MG, changes were simulated in the forest cover of Permanent Preservation Areas (APPs) in watershed areas, and the responses in the bioenergetic scenario to the proposed changes in land use and cover were evaluated. It was found that changes in the vegetation cover of small areas can affect the bioenergetic scenario of the entire landscape. The use of models can provide valid and reliable support for landscape and urban planning.

Keywords: Ecological indicator. Landscape connectivity modeling. PANDORA. Thermodynamics. Graphs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.....	21
Figura 2 – Mapa de localização do município de Juiz de Fora.....	23
Figura 3 – Mapa hidrográfico e hipsométrico de Juiz de Fora.....	24
Figura 4 – Sistema de Abastecimento de Água em Juiz de Fora.....	27
Figura 5 – Mapa de clima de Juiz de Fora.....	28
Figura 6 – Mapa de caracterização geral de Juiz de Fora.....	31
Figura 7 – Etapas principais do processo de geração dos mapas anuais de cobertura e uso da terra.....	33
Gráfico 1 – Acurácia Total Anual da Coleção 5.....	35
Figura 8 – Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo.....	40
Figura 9 – Perfil de Latossolo Amarelo.....	40
Figura 10 – Perfil de Cambissolo Háplico.....	41
Figura 11 – Perfil de Cambissolo Húmico.....	41
Figura 12 – Mapa de uso e cobertura do solo do município de Juiz de Fora.....	64
Figura 13 – Mapa de Capacidade Biológica Territorial (BTC) por classe de uso e cobertura do solo.....	65
Figura 14 – Diagrama Sankey da transição de uso e cobertura do solo de Juiz de Fora no período de 1985 a 2020.....	66
Gráfico 2 – Série História de Silvicultura de eucalipto no município de Juiz de Fora, no período de 2014 a 2020.....	67
Figura 15 – Mapa de solo do município de Juiz de Fora.....	69
Figura 16 – Mapa de erosão do município de Juiz de Fora.....	70
Figura 17 – Mapa de BELUs e barreiras ao fluxo de bioenergia de Juiz de Fora.....	73
Figura 18 – Mapa da cobertura florestal em APPs nos cenários atual e alternativos.....	76
Figura 19 – Interseção das áreas de APPs nas BELUs.....	77
Figura 20 – Mapas de Bioenergia Assintótica em nível de biótopos.....	80
Figura 21 – Gráfico da Bioenergia da Paisagem (BELG) para o cenário atual.....	81
Figura 22 – Mapas de Bioenergia inicial e de equilíbrio por BELU nos cenários atual e alternativos.....	84
Figura 23 – Variação dos fluxos energéticos entre a BELU 72 e outras Unidades adjacentes de 1º nível.....	88
Figura 24 – Relação entre características das barreiras e o fluxo bioenergético entre BELUs.....	88
Figura 25 – Disposição da rede.....	92
Figura 26 – Classificação das BELUs pelos graus dos vértices do BELG.....	93
Figura 27 – Distribuição dos graus dos vértices do BELG.....	94
Figura 28 – Centralidade de autovetor do BELG.....	95
Figura 29 – Mapa dos clusters e centralidade de autovetor do BELG.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rede hidrográfica do município de Juiz de Fora.	25
Tabela 2 – Tipos de solos existentes em Juiz de Fora.....	29
Tabela 3 – Unidades de Conservação existentes em Juiz de Fora.....	30
Tabela 4 – Matriz de confusão ou matriz de erros amostral genérica	34
Tabela 5 – Classificação adaptada de tipologias de uso e cobertura do solo observadas na área de estudo.	36
Tabela 6 – Atribuição de peso relativo à fertilidade do solo	42
Tabela 7 – Pesos da erosão do solo	43
Tabela 8 – Tipologias climáticas do município de Juiz de Fora.....	44
Tabela 9 – Permeabilidade das barreiras selecionadas.....	47
Tabela 10 – Quantitativo das classes de uso e cobertura do solo do município de Juiz de Fora.....	62
Tabela 11 – Detalhamento dos dados de transição do uso e cobertura do solo de Juiz de Fora, no período de 1985 a 2020	66
Tabela 12 – K_{solo} do município de Juiz de Fora.....	68
Tabela 13 – $K_{erosão}$ das BELUs do município de Juiz de Fora.....	71
Tabela 14 – $K_{umidade}$ das BELUs do município de Juiz de Fora	72
Tabela 15 – BELUs com maiores áreas territoriais	74
Tabela 16 – APPs em áreas de mananciais e Eixo do Rio Paraibuna	78
Tabela 17 – Relação entre área e Bioenergia de Equilíbrio.....	83
Tabela 18 – Variações de Bioenergia de equilíbrio para os espaços naturais protegidos e áreas verdes urbanas.....	87
Tabela 19 – Somatório e variação do fluxo bioenergético.....	89
Tabela 20 – Variações da Bioenergia do Ecossistema (M_{tot}), da Bioenergia Generalizada (M^{astot}) e índice dM_{tot} dos cenários alternativos.	90
Tabela 21 – Composição dos <i>clusters</i> obtidos por meio do Algoritmo de Leiden	93
Tabela 22 – Quantitativo de conexões (grau) das BELUs	94
Tabela 23 – Variações da Bioenergia do Ecossistema (M_{tot}), da Bioenergia Generalizada (M^{astot}) e índice dM_{tot} dos cenários alternativos individualizados em <i>clusters</i>	97
Tabela 24 – Fluxo bioenergético entre a BELU 71 e Unidades adjacentes.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
BELC	Bioenergia de Conectividade da Paisagem (do inglês <i>Bio-Energy Landscape Connectivity</i>)
BELG	Gráfico de Bioenergia da Paisagem (do inglês <i>Bio-Energy Landscape Graph</i>)
BELU	Unidades Bioenergéticas da Paisagem (do inglês <i>Bio-Energy Landscape Unit</i>)
BTC	Capacidade Biológica Territorial (do inglês <i>Biological Territorial Capacity</i>)
CA1	Cenário Alternativo 1
CA2	Cenário Alternativo 2
CA3	Cenário Alternativo 3
CHd	Cambissolo Húmico Distrófico
CLC	CORINE Land Cover
CORINE	<i>Co-ordination of Information on the Environment</i>
CXbd	Cambissolo Háplico Tb Distrófico
DN COPAM	Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
EEA	Agência Europeia do Ambiente (do inglês <i>European Environment Agency</i>)
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GBE	Bioenergia Generalizada (do inglês <i>Generalized Biological Energy</i>)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE-Sisema	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais
IGAM	Instituto de Gestão das Águas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System

JRC	Centro Comum de Investigação (do inglês <i>Joint Research Centre</i>)
LAd	Latossolo Amarelo Distrófico
LVAAd	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico
MA3	Macroárea de Interesse Ambiental e de Preservação dos Mananciais
MZP	Macrozona do Eixo do Paraíba
PVM	População Viável Mínima
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
Sisema	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Minas Gerais)
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
UC	Unidade de Conservação
UE	União Europeia
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UTM	Universal Transverso de Mercator
ZEE-MG	Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
\cong	Aproximadamente igual
M^{asI}	Bioenergia assintótica (ou de equilíbrio) da BELUi
M_{tot}	Bioenergia do Ecossistema
M_i	Bioenergia Generalizada da BELUi
M^{astot}	Bioenergia Generalizada Total
Ca^{2+}	Cátion Cálcio
Mg^{2+}	Cátion Magnésio
K^+	Cátion Potássio
ha	Hectare
=	Igual
dMtot	Índice da Bioenergia Generalizada do sistema global
K_i^{ec}	K Ecótopo
K_i^{er}	K Erosão
K_i^{sl}	K Solo
K_i^{um}	K Umidade
K_i^{ve}	K Vegetação
>	Maior que
\geq	Maior ou igual que
\pm	Mais ou menos
Mcal	Megacalorias
<	Menor que
m^2	Metro quadrado
\in	Pertence
Φ	Phi
%	Porcentagem
V%	Porcentagem de Saturação por Bases
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Grafos e o modelo PANDORA.....	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 METODOLOGIA	19
3.1 ÁREA DE ESTUDO	22
3.2 ELABORAÇÃO DE MAPAS BASE	32
3.2.1 Coleta e preparação dos dados cartográficos e imagens de satélite.	32
3.2.1.1 Mapas de Uso e Cobertura do Solo.....	32
3.2.1.2 Mapas de Solo.....	38
3.2.1.3 Mapas de Erosão.....	42
3.2.1.4 Mapas de Distribuição de Umidade	43
3.2.1.5 Mapas das Unidades Bioenergéticas da Paisagem.....	45
3.3 DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS	48
3.4 O MODELO PANDORA 3.0.....	50
3.5 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	53
3.5.1 Cálculo dos valores de $K_{\text{ecótopo}}$	54
3.5.2 Cálculo dos valores de K_{solo}	55
3.5.3 Cálculo dos valores de $K_{\text{erosão}}$	55
3.5.4 Cálculo dos valores de K_{umidade}	56
3.5.5 Cálculo dos valores de $K_{\text{vegetação}}$	56
3.6 ÍNDICE DE BIOENERGIA DO ECOSSISTEMA	57
3.7 GRÁFICO DE FLUXO DE BIOENERGIA ENTRE BELUS (BELG).....	57
3.8 EVOLUÇÃO DA ENERGIA DA PAISAGEM	58
3.9 CÁLCULO DA BIOENERGIA GENERALIZADA (GBE)	59
3.10 ANÁLISE DA ESTRUTURA DO BELG	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 USO E COBERTURA DO SOLO	62
4.2 TIPOS DE SOLO	67
4.3 EROSIÃO	68
4.4 DISTRIBUIÇÃO DE UMIDADE.....	71
4.5 UNIDADES BIOENERGÉTICAS DA PAISAGEM.....	72
4.6 CENÁRIOS ALTERNATIVOS: DEMARCAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS APPS	74

4.7 DINÂMICA BIOENERGÉTICA DA PAISAGEM NOS CENÁRIOS ATUAL E ALTERNATIVOS	78
4.7.1 Dinâmica Bioenergética em nível dos biótopos para os cenários atual e alternativos	78
4.7.2 Caracterização do BELG para os cenários atual e alternativos	79
4.8. ESTRUTURA DO BELG	91
4.8.1 Disposição espacial e clusterização.....	91
4.8.2 Centralidades	93
4.8.2.1 <i>Distribuição dos graus dos vértices</i>	93
4.8.2.2 <i>Autovetor (Eigenvector Centrality)</i>	95
4.9 DINÂMICA ENERGÉTICA ENTRE AS PARTIÇÕES DA REDE.....	96
5 CONCLUSÃO	101
REFERÊNCIAS.....	102
ANEXO A – Tabela de índices BTC aplicado às classes de uso e cobertura do solo de 3º nível categórico do CORINE Land Cover, adaptado às em zonas tropicais	114
ANEXO B – Códigos das classes da legenda e paleta de cores utilizadas na Coleção 5 do Projeto MapBiomass.....	115
ANEXO C – Códigos das classes da legenda utilizados no CORINE Land Cover.	116
ANEXO D – Caracterização das BELUs definidas em Juiz de Fora	117

1 INTRODUÇÃO

Pressões antrópicas, como a expansão contínua de infraestruturas, conversão de áreas naturais em áreas agrícolas e o desmatamento, estão relacionadas à degradação de ecossistemas e fragmentação de habitats (WILCOVE *et al.*, 1986, HADDAD *et al.*, 2015). Esses fatores podem afetar a capacidade dos ambientes naturais de oferecer serviços ecossistêmicos essenciais à vida humana (WU; 2013), como abastecimento de água, regulação do clima, solo fértil, polinização, produção de alimentos, controle da poluição atmosférica e sonora e diversidade de espécies, além de possibilitar experiências recreativas, estéticas e espirituais (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005; JOLY *et al.*, 2019).

As infraestruturas constituem barreiras aos fluxos de energia, de materiais e o fluxo gênico entre populações (ZOLLNER & LIMA 1999; COULON *et al.*, 2004; FOLTÊTE *et al.*, 2012; NG *et al.*, 2013) e, somadas às barreiras naturais, como grandes rios e montanhas escarpadas, limitam o potencial de dispersão de organismos entre as manchas de habitat e a colonização de espécies (PRIMACK, 2014).

Quanto mais fragmentado e mais barreiras existirem em um ecossistema e menores as manchas de vegetação, maior o risco de extinção de espécies devido a processos estocásticos demográficos, genéticos e ambientais (MacARTHUR & WILSON, 1967; SHAFFER, 1981; SOULÉ, 1985; LINDENMAYER *et al.*, 1993; GIBBS, 2001). Shaffer (1981) definiu uma população viável mínima (PVM) como a menor população isolada que tenha 99% de chance de se manter viável por 1000 anos. A depender do tamanho populacional, um rápido e acelerado declínio no número de indivíduos (vórtice de extinção) pode ser provocado por forças aleatórias, não-adaptativas, que prevalecem sobre forças determinísticas, adaptativas.

Para minimizar os impactos da fragmentação ambiental, é necessário, então, promover a conectividade da paisagem e manutenção e/ou restauração de processos ecológicos (PARDINI *et al.*, 2005). A conectividade, definida como o grau no qual uma paisagem facilita ou restringe o fluxo de biodiversidade, de materiais e de energia entre fragmentos de vegetação (TAYLOR *et al.*, 1993), é elemento crítico para as dinâmicas populacionais (FAHRIG & PALOHEIMO, 1988; UROY *et al.*, 2019) e para o incremento da biodiversidade e a resiliência da paisagem como um todo.

A conectividade ecológica é essencial para que as comunidades biológicas interajam e se estruturam em redes complexas. Quanto maior a complexidade das interações entre comunidades, alcançada por meio de processos evolutivos de sistemas ecológicos, maior a proteção contra as perturbações advindas do ambiente físico (ODUM, 1969; BORRETT *et al.*, 2012; EKLOF *et al.*, 2012).

A capacidade dos ecossistemas de alcançarem estruturas orgânicas mais complexas e diversificadas é condicionada pelas condições físicas do ambiente, tais como solo, água, clima, e pela entrada de energia no sistema (ODUM, 1969). No clímax dos processos de sucessão ecológica, a biomassa máxima e a simbiose entre os organismos são mantidas por unidade de fluxo de energia disponível (ODUM, 1983; ODUM *et al.*, 1995). Os fluxos de energia caracterizam, então, as condições tróficas, estruturais e de ciclos de materiais dentro do sistema. Considerar as leis da termodinâmica e suas implicações na entropia dos ecossistemas, possibilita uma abordagem integradora da conservação, da restauração e da conectividade no planejamento territorial (CAPRA, 1996; MATURANA & VARELA, 1997; AUMOND, 2003).

1.1 GRAFOS E O MODELO PANDORA

Na Ecologia da Paisagem, muitas técnicas podem ser utilizadas para identificar e entender as relações entre padrões espaciais e processos ecológicos, as interações de ecossistemas heterogêneos, as influências e manejo da heterogeneidade espacial nos processos ecológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (BARRET & PELES 1999; METZGER, 2001; WU & HOBBS, 2002; RUTLEDGE, 2003). Uma delas é a Teoria dos Grafos, aplicada à Ecologia desde 1880 (CAMERANO, 1880).

Um grafo $G(V, A)$ pode ser definido matematicamente como um conjunto de vértices $V(G)$ e arestas $A(G)$ (HARARY, 1969). Os grafos têm sido utilizados para representar um conjunto de unidades da paisagem que têm potencial para interagir em um sistema. No gráfico, os nós representam as unidades e as interações ou fluxos de energia entre elas são representados pelas arestas (STEWART, 2004). A conectividade pode ser medida como o “grau de um nó”, ou seja, o número de ligações conectadas a uma determinada unidade (CANTWELL & FORMAN, 1993). Os diagramas podem, portanto, ser aplicados para reduzir a complexidade das paisagens e revelar padrões de interações ou fluxos ecológicos. A aplicação dos grafos de

paisagem possibilita a priorização conservacionista em redes ecológicas, a identificação dos melhores locais para adicionar novos elementos à rede de modo a ampliar as conexões entre fragmentos e estimar o impacto da implantação de infraestruturas sobre a conectividade da paisagem (FOLTÊTE *et al.*, 2014). Linehan *et al.* (1995) destacam que o planejamento do uso do solo com foco nas as redes ecológicas visa assegurar a conservação da estrutura e função dos ecossistemas de maneira mais ampla, atendendo às necessidades de áreas naturais e o desenvolvimento econômico.

Com base na Teoria dos Grafos (CANTWELL & FORMAN, 1993), Gobattoni *et al.* propuseram em 2011 o modelo PANDORA, aperfeiçoado em GOBATTONI *et al.*, 2012, GOBATTONI *et al.*, 2014, PELOROSSO *et al.*, 2016 e PELOROSSO *et al.*, 2017, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão de gestores envolvidos no planejamento paisagístico e urbano por meio da avaliação dos diferentes cenários de mudanças no uso da terra (PELOROSSO *et al.*, 2016).

PANDORA integra conceitos termodinâmicos, equilíbrio matemático, teoria metabólica e métricas da paisagem (GOBATTONI *et al.*, 2011). O modelo avalia a paisagem como um sistema único que responde às leis da termodinâmica e busca continuamente o estado de equilíbrio energético metaestável, condicionado por mudanças no padrão de uso e cobertura do solo (PELOROSSO *et al.*, 2016).

O modelo quantifica a energia processada pela vegetação (bioenergia) e seus fluxos entre unidades da paisagem ou Unidades Bioenergéticas da Paisagem (do inglês *Bio-Energy Landscape Unit* – BELU). Uma BELU é uma porção da paisagem com homogeneidade variável, limitada por barreiras reconhecíveis e significativas aos fluxos de bioenergia. As Unidades estão em um nível hierárquico superior em relação ao mosaico composto pelos biótopos (GOBATTONI *et al.*, 2011; PELOROSSO *et al.*, 2017). A conectividade estrutural da paisagem é avaliada em termos de energia, denominada pelos autores de Conectividade da Paisagem Bioenergética (do inglês *Bio-Energy Landscape Connectivity* – BELC). O estado ecológico do sistema pode ser avaliado por meio da determinação quantitativa dos fluxos de energia entre as diferentes BELUs (Gobattoni *et al.*, 2014).

Dessa forma, PANDORA analisa a paisagem em uma abordagem multiescalar. A primeira é a dos biótopos componentes das Unidades Bioenergéticas. Nessa escala, cada BELU é considerada um ecossistema individual. Em segunda escala, o modelo considera a bioenergia das BELUs e os fluxos de energia entre elas, obtendo-

se o Gráfico de Bioenergia (do inglês *Bio-Energy Landscape Graph* - BELG) e, na escala da paisagem, possibilita a análise global do ecossistema a partir da aplicação do índice de Bioenergia Generalizada total (do inglês *Generalized Biological Energy* - GBE) no estado de equilíbrio metaestável. A GBE é a energia disponível para troca nas BELUs e no sistema geral e é calculada como a soma da energia assintótica de todos os fragmentos dentro da BELU e, em seguida, de todas as BELUs (PELOROSSO *et al.*, 2021). Além disso, o modelo oferece o perfil bioenergético das três escalas nas dimensões temporais atual e de equilíbrio (ou assintótica), que simula a evolução bioenergética da paisagem em ciclos ou iterações definidas pelo usuário.

O modelo obtém indicadores que descrevem a conectividade da paisagem e a análise dos padrões estruturais do BELG oferece informações que permitem a compreensão dos processos que moldam os sistemas ecológicos e de como suas partes em interação respondem às alterações da cobertura e uso do solo (GOBATTONI *et al.*, 2014; PELOROSSO *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2018; GUIMARÃES, 2020; MONACO *et al.*, 2020; PELOROSSO *et al.*, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Visando subsidiar o planejamento territorial e ambiental de municípios localizados na região Neotropical, considerando a complexidade das interações entre os ambientes urbano, periurbano e rural, este estudo teve como objetivo quantificar e comparar a produção e o fluxo de bioenergia atual com cenários alternativos de alteração da cobertura florestal de Áreas de Preservação Permanente (APP) de entorno de corpos e cursos d'água em áreas de mananciais hídricos, de modo a avaliar a sua contribuição para a conectividade e conservação ambiental do território.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo traçado, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Obter imagens e bases cartográficas facilmente acessíveis ao gestor público;
- Elaborar mapas base e obter dados de variáveis ambientais necessários para a modelagem da produção e dos fluxos de bioenergia do território no modelo PANDORA 3.0 (GOBATTONI *et al.*, 2014; PELOROSSO *et al.*, 2016; PELOROSSO *et al.*, 2017);
- Adequar os parâmetros do PANDORA 3.0 para as condições neotropicais;
- Obter o estado atual de bioenergia das Unidades Bioenergéticas da Paisagem (BELU) e seus biótopos, determinar o Gráfico de Bioenergia da Paisagem (BELG) e, posteriormente, a evolução da Bioenergia da Paisagem;
- Identificar APPs em áreas de mananciais de abastecimento;
- Simular a bioenergia produzida nas BELU, o BELG e a evolução da Bioenergia da Paisagem em três cenários alternativos (CA): (i) CA1, com substituição de todas as formações vegetacionais por pastagem em 100% das APPs; (ii) CA2, com restauração da cobertura florestal de até 30% do total das APPs; e (iii) CA3, com restauração da cobertura florestal de até 70% do total das APPs;
- Comparar o cenário bioenergético atual e a evolução da bioenergia do sistema com os dados obtidos a partir das simulações realizadas para as APPs identificadas;

- Comparar a bioenergia real produzida por Unidades de Conservação e área verdes urbanas e os fluxos entre suas BELUs adjacentes com os dados obtidos nas simulações dos cenários alternativos.

- Analisar a estrutura do BELG e a dinâmica energética entre as partições da rede.

Para tanto, realizou-se estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais.

3 METODOLOGIA

Para a realização do trabalho foram utilizados recursos de sensoriamento remoto; os *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS, versões 3.16 - Hannover (QGIS, 2021) e 2.16 - Nødebo (QGIS, 2016), GRASS, versão 7.8 (GRASS, 2020), PANDORA 3.0 (GOBATTONI *et al.*, 2014; PELOROSO *et al.*, 2016; PELOROSSO *et al.*, 2017) e o software de análise de redes Gephi 0.10.1 (BASTIAN *et al.*, 2009)

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) integra programas, equipamentos, metodologias, dados e usuários para tornar possível a coleta, o armazenamento e o processamento de dados georreferenciados, de modo a produzir e analisar informações geográficas (TEIXEIRA, 1995). A rede, componente mais recente do SIG, possibilita a integração de dados e sistemas, o armazenamento e o processamento remoto e em nuvem (LONGLEY *et al.*, 2013). Para realizar o processamento dos dados e informações geoespaciais, o SIG QGIS conta com ampla arquitetura de *plugins*, complementos que adicionam recursos e funções ao aplicativo, além daquelas nativas (QGIS, 2022).

O sensoriamento remoto permite a obtenção de imagens da superfície terrestre por meio de sensores embarcados em satélites artificiais ou aeronaves. Tais imagens são armazenadas em representação matricial (raster) de pixels (ou células) que têm o mesmo tamanho e representam características ou fenômenos associados à sua localização, em determinado instante ou período de tempo. Um pixel é a menor unidade de uma imagem digital. Além dos dados de sensoriamento remoto, os dados raster típicos são constituídos também por dados modelados, como elevação ou temperatura (IBGE, 2019a; QGIS, 2022). As imagens utilizadas neste trabalho têm 30m de resolução e correspondem ao pixel das imagens Landsat (PROJETO MAPBIOMAS, 2021b).

Para a localização espacial de qualquer feição sobre a superfície terrestre utiliza-se um Sistema Geodésico de Referência (SGR). Os sistemas de referência geodésicos globais possibilitam levantamentos de melhor precisão e acurácia, uma vez que são compatíveis com modernas técnicas de posicionamento espacial 3D. Quando sua origem é o centro de massa do planeta são denominados geocêntricos. Com a edição da Resolução IBGE N°1, de 25 de fevereiro de 2005 (IBGE, 2005), o Brasil adotou oficialmente o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas -

SIRGAS2000, uma densificação do Sistema de Referência Internacional (*International Terrestrial Reference System/Frame - ITRS/ITRF*) 2000, nas Américas (BORGES *et al.*, 2017).

Neste trabalho, todos os dados foram georreferenciados no sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM), *Datum* SIRGAS2000, Fuso 23 Sul. O sistema de projeção UTM é baseado no plano cartesiano e tem o metro (m) como unidade para medir distâncias e determinar a posição de um objeto, sendo esta a sua melhor aplicação, uma vez que mantém os ângulos das feições. No entanto, a medição de distâncias e áreas apresenta alguma imprecisão. Ainda assim, é considerado um dos melhores sistemas de projeção para a cartografia de médias e grandes escalas.

A aplicação metodológica seguiu as seguintes etapas (Figura 1):

1) Elaboração de mapas base, preparação dos dados de entrada e adequação dos parâmetros do modelo PANDORA 3.0 para as zonas tropicais;

2) Identificação de Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo de cursos e corpos d'água localizados nas bacias dos mananciais de abastecimento público municipal;

3) Modelagem para obtenção do Gráfico de Bioenergia da Paisagem (BELG) para os cenários real e alternativos;

4) Modelagem da evolução da Bioenergia da Paisagem da área de estudo para os cenários real e alternativos;

5) Obtenção dos mapas e gráficos comparativos para os cenários em análise.

As fases 3 a 5 compõem os resultados do estudo.

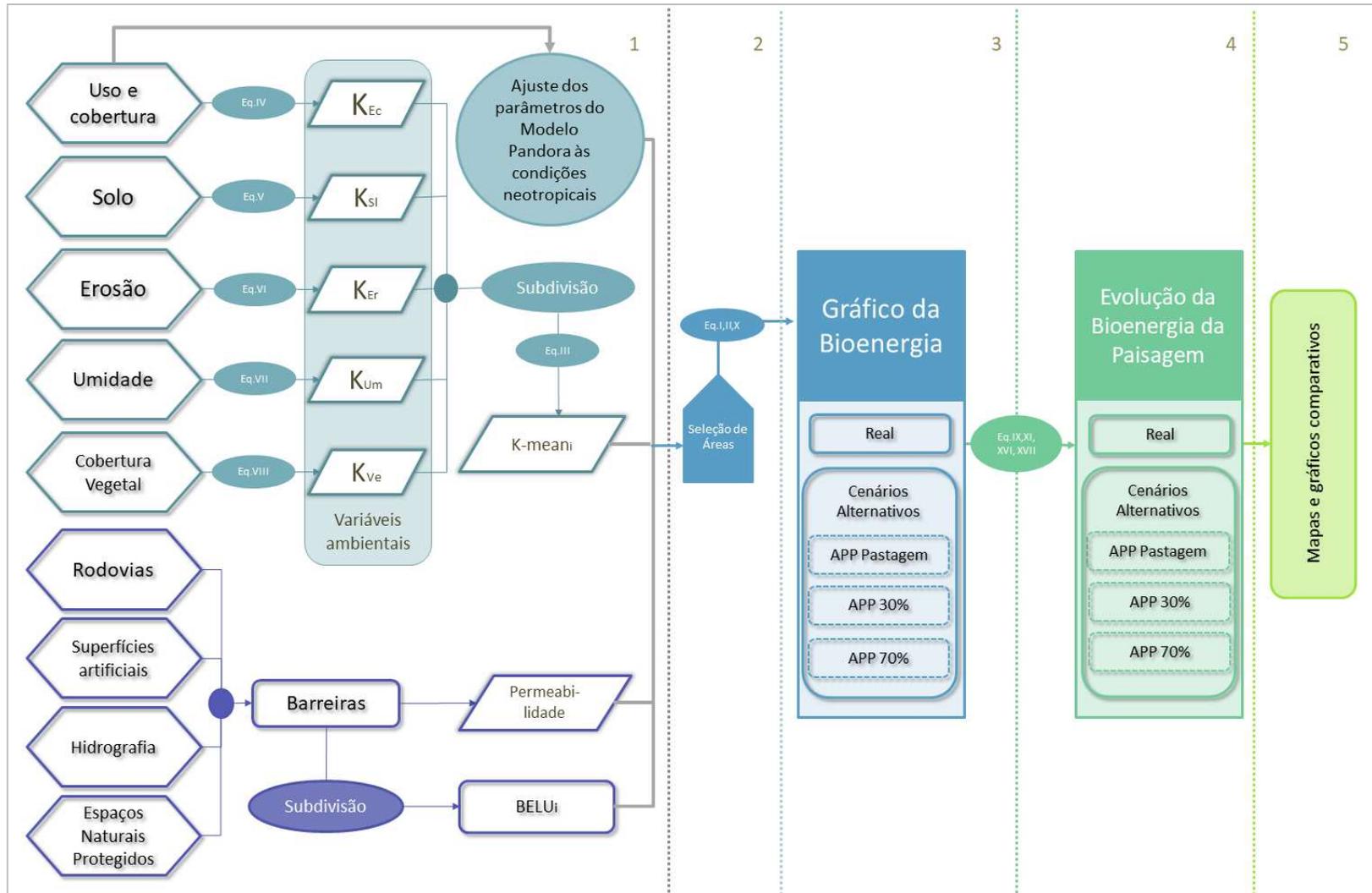


Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho. Fonte: Elaborada pela autora.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Juiz de Fora tem área de unidade territorial de 1.435,749 km². Está localizado no Bioma Mata Atlântica, um dos *hotspots* de biodiversidade reconhecidos mundialmente (MYERS *et al.*, 2000; MITTERMEIER *et al.*, 2004), que sofreu intensa alteração de suas paisagens naturais por atividades antrópicas.

Juiz de Fora está situada no sudeste do estado de Minas Gerais, Mesorregião Geográfica Zona da Mata, Microrregião 065 (Juiz de Fora). A sede municipal localiza-se nas coordenadas geográficas: 21°76' Sul e 43°35' Oeste (IBGE, 2021a e 2022a). Os municípios limítrofes são: ao norte, Ewbanck da Câmara e Santos Dumont; a nordeste, Piau e Coronel Pacheco; a leste, Chácara e Bicas; a sudeste, Pequeri e Santana do Deserto; ao sul, Matias Barbosa e Belmiro Braga; a sudoeste, Santa Bárbara do Monte Verde; a oeste, Lima Duarte e Pedro Teixeira; e, a noroeste, Bias Fortes e Santos Dumont (JUIZ DE FORA, 2018b) (Figura 2).

Em relação à hierarquia urbana, trata-se de Capital Regional 2B, que indica sua centralidade de acordo com a atração que exerce a populações de outros centros urbanos para acesso a bens e serviços e o nível de articulação territorial por estar inserida em atividades de gestão pública e empresarial. O município apresenta 55.5% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 53% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio). O esgotamento sanitário adequado está disponível para 94.1% dos domicílios (IBGE, 2019b).

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal em 2010 era de 0,778 e a população era de 516.247 pessoas, com densidade demográfica de 359,59 hab/km², sendo 98,90% desta população residente em área urbana (IBGE, 2012). A população do município foi estimada pelo IBGE no ano de 2021 em 577.532 habitantes, indicando crescimento populacional de aproximadamente 11,80% para o período 2010-2021 (IBGE, 2022b).

O sistema rodoviário que atende Juiz de Fora é integrado pelas rodovias BR-267, BR-393, BR-116 e MG-353, tendo como eixo articulador a BR-040, que liga Belo Horizonte e Rio de Janeiro. Na área urbana, as Avenidas Brasil, Presidente Juscelino Kubitschek, Barão do Rio Branco e Presidente Itamar Franco são as principais vias centrípetas.



Figura 2 – Mapa de localização do município de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

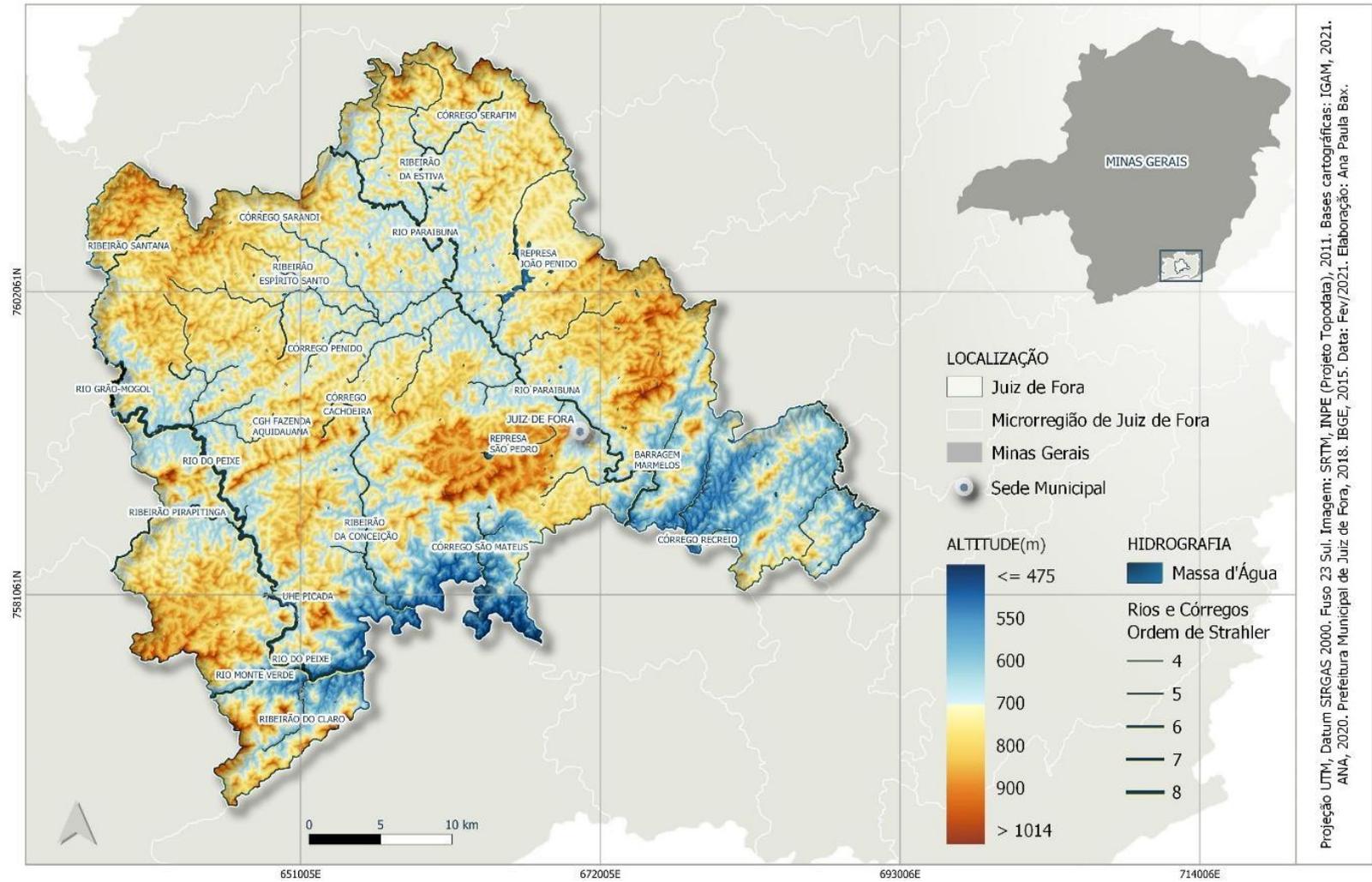


Figura 3 – Mapa hidrográfico e hipsométrico de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

O transporte aéreo é atendido principalmente por meio do Aeroporto Regional da Zona da Mata, localizado na rodovia MG-353, município de Goianá/MG, distante 40 km de Juiz de Fora. O aeroporto tem capacidade para 600 mil passageiros por ano (CAZM, 2022).

Com relação à hidrografia (Figura 3), Juiz de Fora está totalmente inserido na Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Preto e Paraibuna (PS1). O rio Paraibuna, afluente do rio Paraíba do Sul, passa por Juiz de Fora a 680m de altitude, constituindo-se no principal receptor dos efluentes dessa bacia. Seus afluentes principais são o rio do Peixe e o rio Preto na margem direita e o rio Cágado na margem esquerda (CBH-PS1, 2019).

No interior da mancha urbana de Juiz de Fora, os principais afluentes do rio Paraibuna são: Ribeirão Ipiranga, Lamaçal, Matirumbide, Yung, São Pedro, Carlos Chagas, Humaitá, Ribeirão das Rosas, Facit, Artilharia, Ribeirão dos Burros, Santa Cruz, Três Pontes e Ribeirão do Espírito Santo (CESAMA, 2022).

A ordem de Strahler designa a complexidade ramificada de uma bacia hidrográfica, indicando o tamanho de um rio com base em uma hierarquia de afluentes. O fluxo de primeira ordem é aquele em que há uma nascente e que não recebe afluentes. Quando dois fluxos de primeira ordem se juntam, formam um fluxo de segunda ordem. Quando um fluxo de segunda ordem se une com outro também de segunda ordem, forma-se um fluxo de terceira ordem (STRAHLER, 1952). A caracterização da rede hidrográfica de quarta a oitava ordem presente nos limites do município de Juiz de Fora está representada na Tabela 1.

Tabela 1 – Rede hidrográfica do município de Juiz de Fora.

Nome do rio	Ordem de Strahler	Domínio	Extensão (m) no município
Córrego Barreiro	4	Não Federal	12.490
Córrego Barriga Lisa	4	Não Federal	7.672
Córrego Bastinho	4	Não Federal	8.845
Córrego Cachoeirinha	4	Não Federal	9.054
Córrego da Rochinha	4	Não Federal	10.618
Córrego do Arrependido	4	Não Federal	3.839
Córrego do Borge	4	Não Federal	1.019
Córrego do Engenho	4	Não Federal	1.024
Córrego do Mata-Burro	4	Não Federal	324
Córrego do Tanque	4	Não Federal	1.430
Córrego Gouveia	4	Não Federal	10.471
Córrego Igrejinha	4	Não Federal	11.696

Nome do rio	Ordem de Strahler	Domínio	Extensão (m) no município
Córrego Morrinhos	4	Não Federal	662
Córrego Morro Grande	4	Não Federal	2.766
Córrego Morro Vermelho	4	Não Federal	945
Córrego Orvalho	4	Não Federal	68
Córrego Penido	4	Não Federal	8.133
Córrego Ponte de Pita ou Santo Inácio	4	Não Federal	1.096
Córrego Recreio	4	Não Federal	3.967
Córrego Salvaterra	4	Não Federal	1.708
Córrego São Marcos ou Santana	4	Não Federal	4.513
Córrego São Pedro	4	Não Federal	8.938
Córrego Sarandi	4	Não Federal	3.543
Córrego Siriritinga	4	Não Federal	2.606
Córrego Taquaras	4	Não Federal	658
Córrego Teixeiras	4	Não Federal	6.486
Córrego Vilaza	4	Não Federal	1.391
Córrego Vista Alegre	4	Não Federal	1.057
Ribeirão das Rosas	4	Não Federal	11.923
Ribeirão do Carmo	4	Não Federal	6.764
Ribeirão do Claro	4	Não Federal	8.720
Ribeirão dos Burros	4	Não Federal	16.090
Ribeirão Espírito Santo	4	Não Federal	22.199
Ribeirão Marmelo ou Floresta	4	Não Federal	4.826
Ribeirão São Fidélis ou Matias	4	Não Federal	7.601
Ribeirão São Mateus	4	Não Federal	11.307
Córrego Cachoeira	5	Não Federal	15.643
Córrego São Mateus	5	Não Federal	7.308
Córrego Serafim	5	Não Federal	8.642
Ribeirão da Conceição	5	Não Federal	16.122
Ribeirão da Estiva	5	Não Federal	9.885
Ribeirão Pirapitinga	5	Não Federal	14.615
Ribeirão Santana	5	Não Federal	7.683
Ribeirão Tabuões	5	Não Federal	93
Rio do Cágado	5	Não Federal	10.410
Rio Monte Verde	6	Não Federal	8.439
Rio Paraibuna	6	Federal	62.180
Rio Grão-Mogol	7	Não Federal	3.965
Rio do Peixe	8	Federal	40.719

Fonte: Adaptado de IGAM (2020)

O abastecimento hídrico de Juiz de Fora é garantido pela Represa de São Pedro, que atende os bairros da parte alta da cidade com capacidade de vazão de 140l/s, e pela Barragem de Chapéu d'Uvas, Ribeirão do Espírito Santo e Represa Dr. João Penido, que abastecem os bairros da parte baixa da cidade e complementam o abastecimento proporcionado pela Represa de São Pedro. Esses mananciais têm

vazão de 900 l/s, 620 l/s e 800l/s respectivamente, totalizando 2.100 l/s (CESAMA, 2022) (Figura 4).

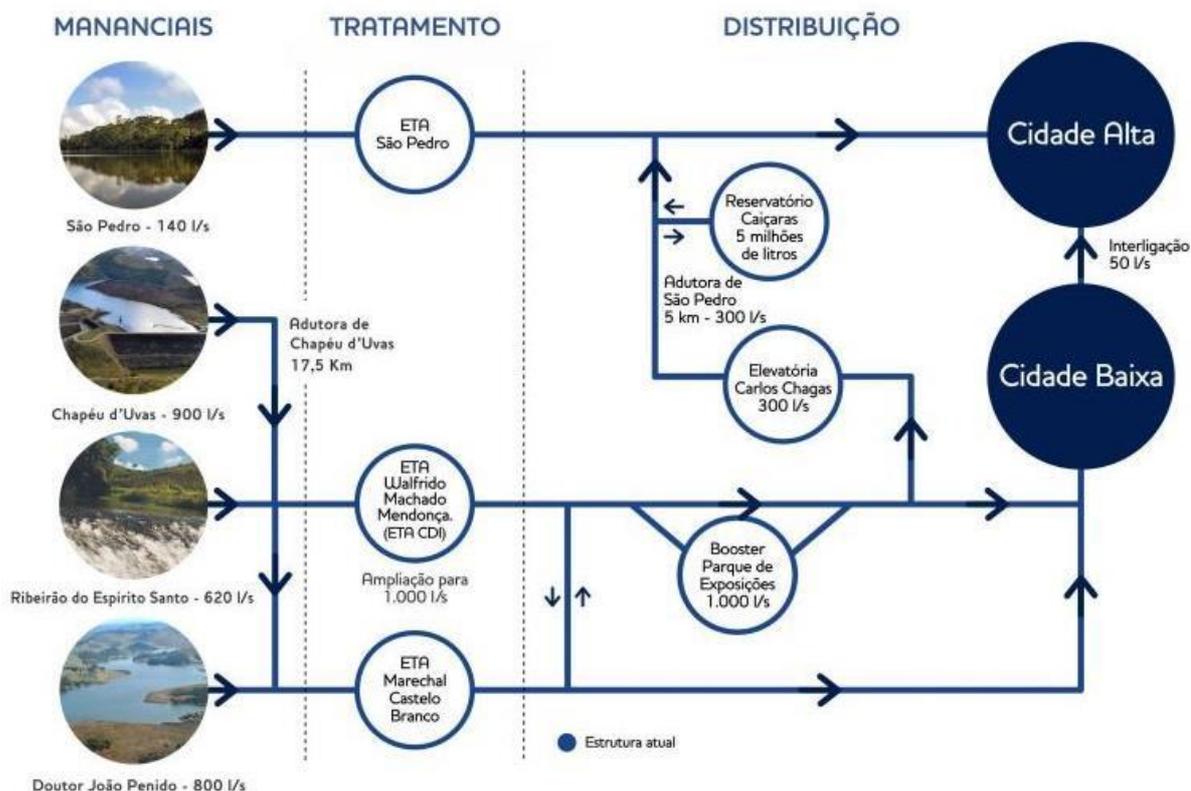


Figura 4 – Sistema de Abastecimento de Água em Juiz de Fora. Fonte: CESAMA (2022)

O clima da região (Figura 5) é classificado como Tropical Brasil Central e se divide basicamente entre clima mesotérmico brando, com média de temperatura entre 10°C e 15°C; úmido com 1 a 2 meses secos; e clima subquente, com média de temperatura entre 15°C e 18°C, semi-úmido, com 4 a 5 meses secos; e subquente úmido, com 3 meses secos (IBGE, 2002).

O município apresenta predomínio de Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, ocupando cerca de 77% do território, e Latossolo Amarelo Distrófico em aproximadamente 20% da área total do município. Ocorrem ainda pequenas porções de Cambissolo Háptico Tb Distrófico e Cambissolo Húmico Distrófico (UFV *et al.*, 2010), conforme a Tabela 2.

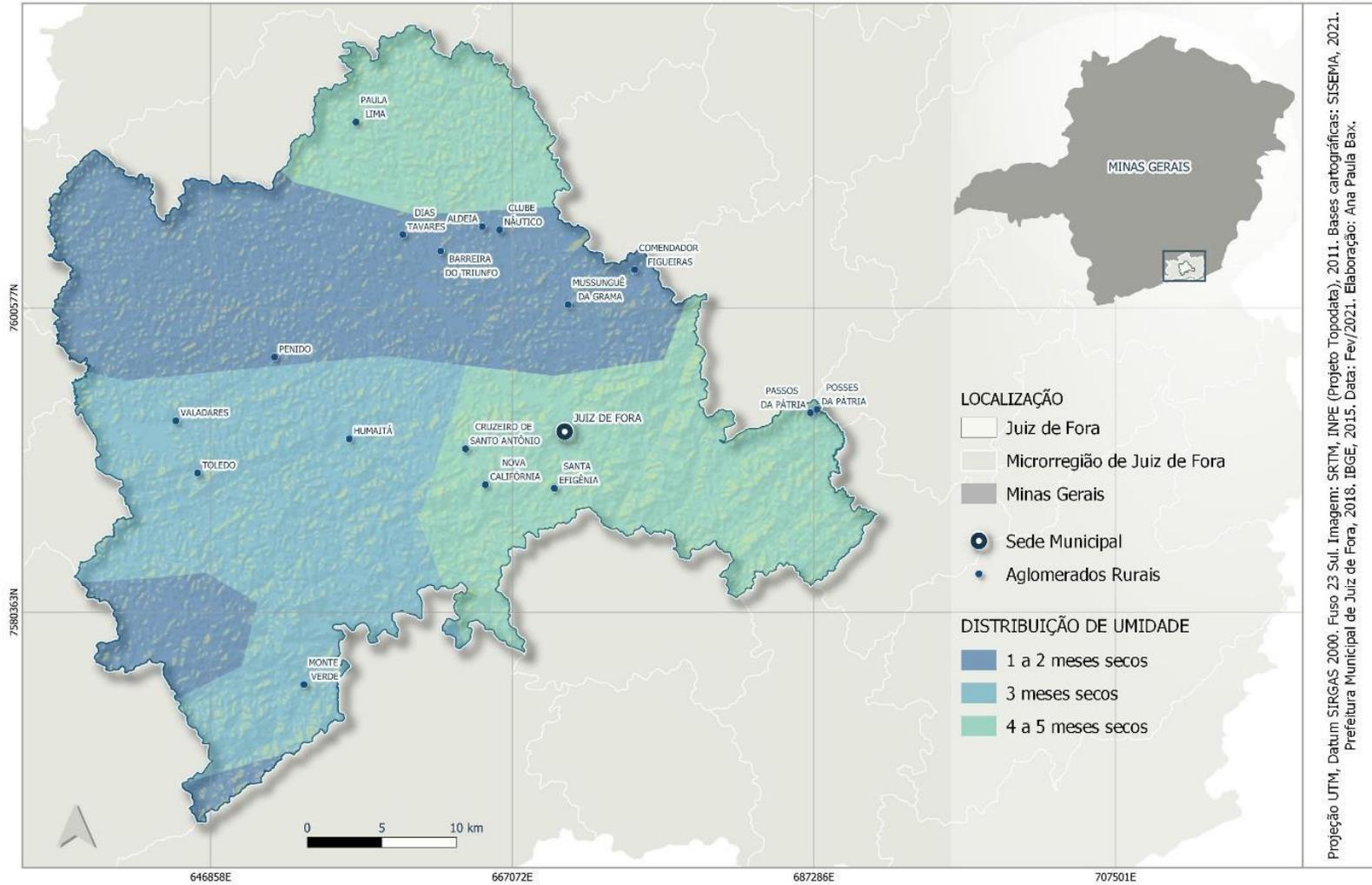


Figura 5 – Mapa de clima de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Tipos de solos existentes em Juiz de Fora

Descrição	Área (ha)	Área (%)
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	110.745,21	77,12
Latossolo Amarelo Distrófico	28.400,17	19,77
Cambissolo Háptico Tb Distrófico	4.453,06	3,10
Cambissolo Húmico Distrófico	10,85	0,007
TOTAL	143.609,29	100,00

Fonte: UFV *et al.*, 2010.

A cultura cafeeira, motor econômico regional durante algumas décadas, deixou como herança o impacto ambiental do plantio realizado sem as técnicas adequadas e com caráter notadamente nômade em que o cultivo avançava sobre áreas de mata original com relevo fortemente acidentado (MACHADO, 1998). Como consequência, o solo perdeu qualidade e os processos erosivos foram acelerados.

Com relação à cobertura do solo, apesar do avanço das áreas urbanizadas e do processo histórico de desmatamento para o cultivo do café e a agropecuária (LESSA, 1985), Juiz de Fora possui remanescentes de Floresta Estacional Semidecidual, fitofisionomia predominante do Domínio Atlântico em Minas Gerais (SCOLFORO & CARVALHO, 2006), com importantes fragmentos de mata em áreas urbanas. No entanto, infraestruturas como edificações, vias urbanas e rodovias constituem barreiras para os fluxos bioenergéticos entre os fragmentos (Figura 6). Em função disso, esses ambientes tendem a apresentar suas características estruturais simplificadas em termos de biodiversidade nativa (MCKINNEY, 2006).

Os fragmentos florestais do município perfazem o total de 383,40 km² e aqueles presentes somente na área do Distrito Sede somam 184,86 km² (PROJETO MAPBIOMAS, 2021b). Os remanescentes florestais acima de 3 hectares representam apenas 11,2% da Floresta Atlântica original no município de Juiz de Fora (SILVA *et al.*, 2020).

Estão presentes no município 10 Unidades de Conservação (UC) (Figura 6) estabelecidas pelas esferas municipal e estadual de governo. A Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000 (conhecida como Lei do SNUC), que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza, define Unidade de Conservação como:

“Espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção.” (BRASIL, 2000)

Segundo a mesma lei, as UCs são agrupadas em Unidades de Proteção Integral, cujo objetivo é preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, e Unidades de Uso Sustentável, que visam compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais.

As UCs existentes no território do município são apresentadas na Tabela 3.

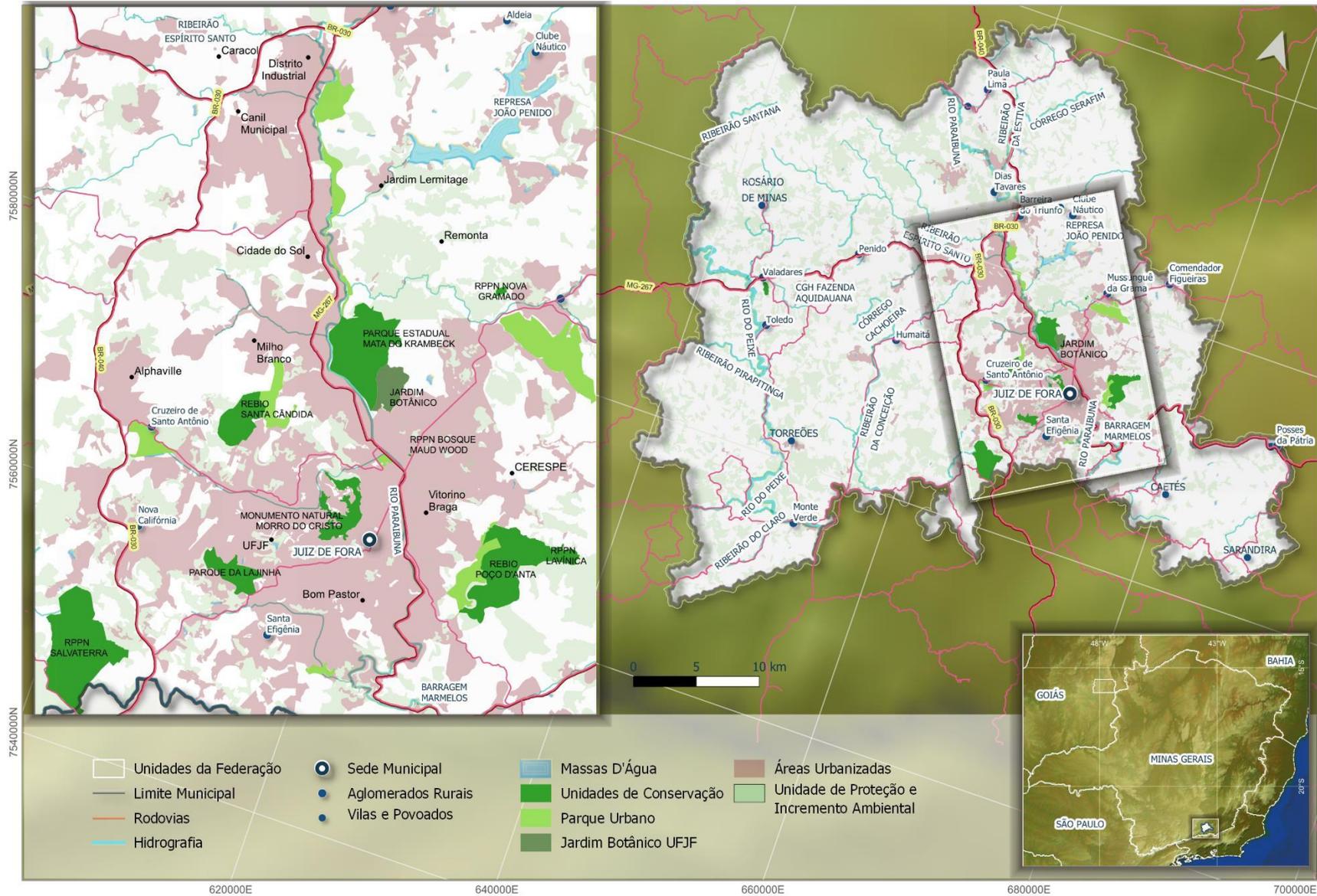
Tabela 3 – Unidades de Conservação existentes em Juiz de Fora

NOME	Esfera	Categoria	Área (ha)	% do território protegido
Monumento Natural Morro do Cristo	Municipal	Prot. Integral	103,83	0,07
Parque Natural Municipal da Lajinha	Municipal	Prot. Integral	88,62	0,06
Reserva Biológica Santa Cândida	Municipal	Prot. Integral	116,25	0,08
Reserva Biológica Poço D'anta	Municipal	Prot. Integral	291,47	0,20
Parque Estadual Mata do Krambeck	Estadual	Prot. Integral	320,05	0,22
RPPN Lavínica	Estadual	Prot. Integral	26,57	0,02
RPPN Salvaterra	Estadual	Prot. Integral	410,10	0,29
RPPN Fazenda Boa Vista	Estadual	Prot. Integral	39,48	0,03
RPPN Nova Gramado	Estadual	Prot. Integral	5,32	0,00
RPPN Bosque Maud Wood	Estadual	Prot. Integral	0,39	0,00
TOTAL:			1.402,10	0,98

Fonte: Adaptado de Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b)

O município conta também com o Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) com área de aproximadamente 82,75ha, com o parque do Museu Mariano Procópio, com área de 9,34ha. As duas áreas naturais protegidas não se enquadram na Lei do SNUC.

No município há ainda o Sesc Minas Pousada, com a presença de fragmento vegetal de cerca de 60ha. Suas instalações de esporte e lazer (área de 5,78ha) foram cedidas ao município, pelo período de 20 anos, para a criação do Parque Municipal de Juiz de Fora (PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA, 2021). Esta área não caracteriza uma Unidade de Conservação ou área natural protegida e, portanto, não foi considerada individualmente neste estudo.



Projeção UTM. Datum Sirgas 2000. Fuso 23 Sul. Imagem: USGS/NASA, 2021. Bases cartográficas: IBGE, 2021. IGAM, 2021. SISEMA, 2021. ANA, 2020. Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, 2018. IBGE, 2016. Data: Mar/2022. Elaboração: Ana Paula Bax.

Figura 6 – Mapa de caracterização geral de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir são detalhadas as etapas de elaboração dos mapas base, o Modelo PANDORA 3.0, o cálculo das variáveis ambientais, o desenvolvimento de cenários alternativos e, finalmente, a obtenção da bioenergia de cada BELU, os fluxos energéticos entre elas e a Bioenergia Generalizada do sistema.

3.2 ELABORAÇÃO DE MAPAS BASE

3.2.1 Coleta e preparação dos dados cartográficos e imagens de satélite.

As informações geográficas necessárias para a realização do trabalho foram obtidas nas bases da Coleção 5 do Projeto MapBiomias (2021b), do Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b), da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-Sisema) (SISEMA, 2021), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021a) e os Modelos Digitais de Elevação do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - Projeto Topodata (BRASIL, 2011), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados administrativos como limites microrregionais, estaduais e nacionais, sedes municipais, aglomerados rurais, vilas, povoados e localidades foram obtidos nas bases cartográficas do IBGE (2021a) e do Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b).

Todo o processamento das informações nesta etapa foi realizado no software QGIS, versão 3.16 - Hannover (2021).

3.2.1.1 Mapas de Uso e Cobertura do Solo

Para a elaboração dos mapas base de uso e cobertura do solo da área de estudo, foram obtidas as imagens do Bioma Mata Atlântica do Projeto MapBiomias (2021b) e, posteriormente, extraído o recorte do território municipal de Juiz de Fora/MG a partir dos limites municipais constantes do *shapefile* disponível no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b). Após a extração, a imagem foi vetorizada.

Uma rede colaborativa de especialistas de diversas instituições e áreas transversais desenvolvem o Projeto MapBiomias (<https://mapbiomas.org/>) com o objetivo de disponibilizar informações anuais e atualizadas de uso e cobertura do solo

do Brasil a partir da automatização de processos de classificação de imagens de satélites Landsat. A base de algoritmos elaborada pela equipe do Projeto permite a disponibilização de dados confiáveis e de baixo custo a partir do ano de 1985 (PROJETO MAPBIOMAS, 2021b).

Até a Coleção 5 o Projeto utilizou dados do topo da atmosfera dos satélites Landsat 5 (TM), 7 (ETM+) e 8 (OLI) para compor os mosaicos de imagens disponibilizados. As imagens, com resolução de 30 metros, são classificadas pixel a pixel com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina por meio da plataforma Google Earth Engine, seguindo as seguintes etapas (Figura 7):

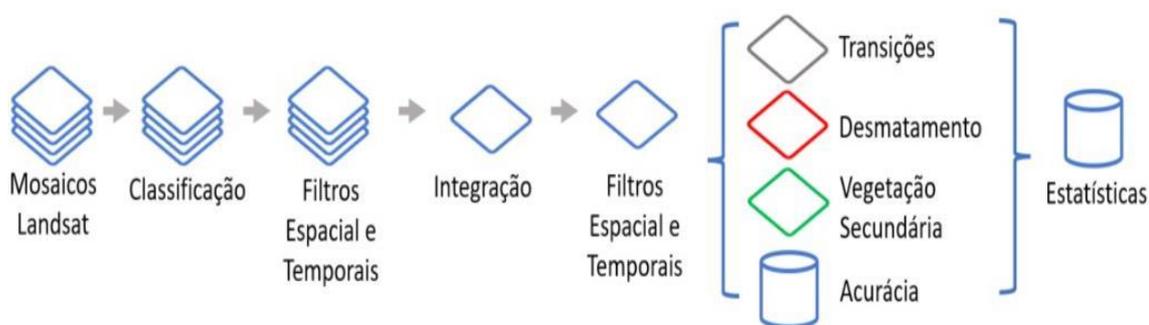


Figura 7 – Etapas principais do processo de geração dos mapas anuais de cobertura e uso da terra. Fonte: Projeto MapBiomias (2021b).

O Projeto MapBiomias analisou a acurácia, global e por classe de uso e cobertura, do mapeamento realizado para todos os anos do período de 1985 a 2020. A análise avalia a qualidade dos dados disponibilizados pelo Projeto e é realizada a partir da tabulação cruzada das frequências amostrais das classes mapeadas e reais. A comparação matricial é atualmente a forma mais comum de análise de acurácia entre dados espaciais (DINIZ, 2021). Quando usada para calcular a proporção de erros ou acertos entre dois conjuntos de dados, é nomeada “Matriz de Confusão” ou “Matriz de Erro”. Ressalta-se que a referência e o dado a ser avaliado devem, necessariamente, representar o mesmo espaço no mesmo período de tempo e avaliar a mesma classe ou tema.

De acordo com a metodologia adotada pelo Projeto MapBiomias (2021a), para cada ano é criada base de dados de referência composta por 75.000 amostras de pixels, cada uma delas avaliada por técnicos treinados em interpretação visual de imagens Landsat. A acurácia é avaliada utilizando-se métricas que comparam a classe de uso e cobertura mapeada com as referências validadas da base de dados.

Neste caso, as colunas correspondem à distribuição, classe a classe, dos dados de referência e as linhas os dados relativos à classificação/mapa (Tabela 4).

Tabela 4 – Matriz de confusão ou matriz de erros amostral genérica

		Dado de Referência (Real)			
		A	B	C	Total
Dados Classificados (Mapa)	A	VA	FP	FP	\sum_c^A
	B	FN	VB	FP	\sum_c^B
	C	FN	FN	VC	\sum_c^C
	Total	\sum_r^A	\sum_r^B	\sum_r^C	\sum^T

Fonte: Adaptado de Diniz (2021).

Os somatórios de cada classe são indicados por $\sum A, \sum B, \sum C$ e a soma agregada de todas as classes é indicada por $\sum T$. O termo FP (Falso-Positivo) refere-se à adição indevida do rótulo “A” a uma classe referenciada como “não-A”. Os falsos-negativos (FN) indicam que uma classe classificada como “não-A” é referenciada como classe A. As respostas verdadeiras (VA, VB e VC) são agrupadas na diagonal principal, constituindo concordância entre a classe referência e a classe atribuída ao dado (DINIZ, 2021).

A partir da análise da matriz de confusão são estimadas as proporções amostrais em cada célula da tabela e a matriz resultante é utilizada para gerar a acurácia do usuário, a acurácia do produtor e a acurácia global.

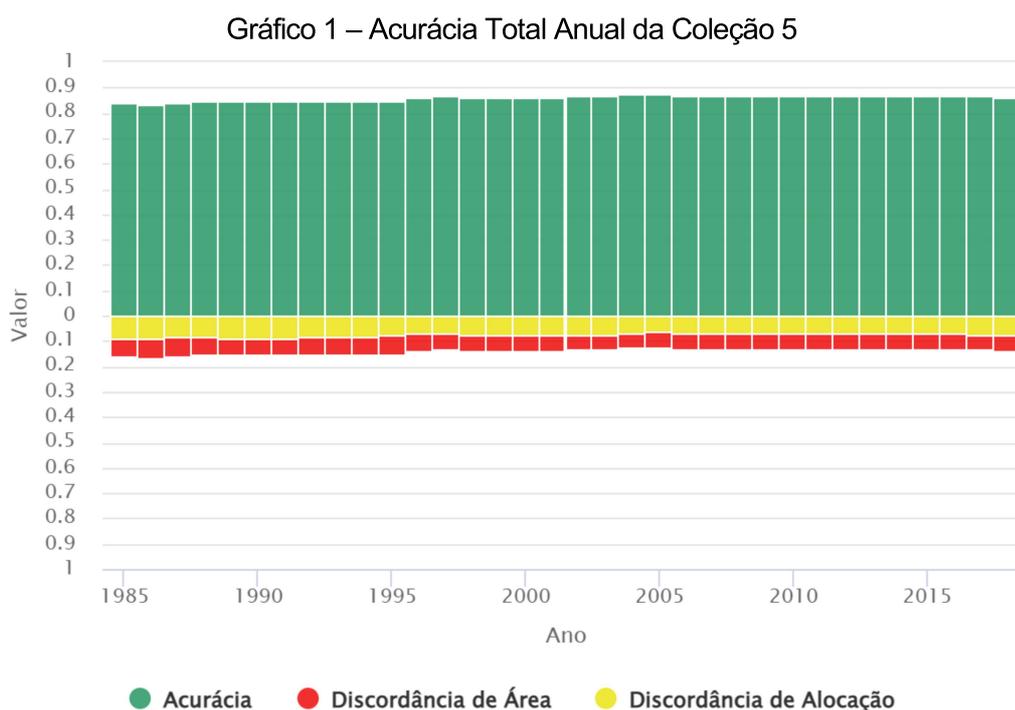
As métricas da acurácia do usuário são associadas à confiabilidade de cada classe de uso e cobertura mapeada. Relatam ao “consumidor” dos dados com que frequência a classe do mapa estará realmente presente no solo ou em sua referência (erro de comissão). A acurácia do produtor refere-se à sensibilidade do classificador em distinguir corretamente uma classe das demais. Reflete a frequência com que as características reais no solo são corretamente mostradas no mapa classificado (erro de omissão). A acurácia global estima a proporção de acerto global dos classificadores (PROJETO MAPBIOMAS, 2021a; DINIZ, 2021).

O detalhamento da metodologia utilizada pelo Projeto MapBiomias (2021b) está disponível em <https://mapbiomas.org/atbd---entenda-cada-etapa> e no Documento

Base Teórico do Algoritmo (do inglês *Algorithm Theoretical Basis Document - ATBD*) e seus apêndices, disponíveis em <https://mapbiomas.org/download-dos-atbds>.

O sistema de classificação utilizado pelo MapBiomas para a Coleção 5 subdivide-se em até 4 níveis categóricos. O nível 1 (classes) contém seis categorias (Floresta, Formação Natural não Florestal, Agropecuária, Área não Vegetada, Corpo D'água e Não Observado). O nível 2 (subclasses), abrange 16 categorias. Apenas as categorias Floresta Natural e Agricultura são subdivididas até o nível categórico 3, e a Lavoura Temporária chega ao nível categórico 4. O sistema de classificação adotado pelo Projeto é apresentado no Anexo B.

Os dados utilizados neste trabalho compõem o bioma Mata Atlântica, em nível 3 de classificação, que indica maior detalhamento de classes de uso e cobertura. A acurácia geral desses dados é de 85,8%, a discordância de alocação de 7,8% e a discordância de área de 6,5% (PROJETO MAPBIOMAS, 2021a), conforme Gráfico 1:



Fonte: Projeto MapBiomas (2021a).

Para os dados de sensores remotos como primeira fonte de dados, a precisão mínima para identificar e interpretar categorias de uso e cobertura de solo é de 85% (ANDERSON *et al*, 1979).

O *plug-in* PANDORA 3.0, utilizado para modelar a bioenergia e a conectividade da paisagem da área de estudo, adota o padrão da União Europeia (UE) para a classificação de uso e cobertura do solo, o CORINE Land Cover (CLC). O Programa CORINE (do inglês *Co-ordination of Information on the Environment*) foi implementado pela Comissão Europeia entre 1985 e 1990 com o objetivo de conceber procedimentos de coleta, normalização e intercâmbio de dados sobre o ambiente nos Estados-Membros da UE, além de estabelecer um sistema de informação sobre o estado ambiental, nomenclaturas e metodologias, desenvolvidas e acordadas a nível europeu. O sistema é indispensável à preparação e execução das políticas comunitárias (EEA, 1992) e sua implementação está a cargo da Agência Europeia do Ambiente (do inglês *European Environment Agency* - EEA) e do Centro Comum de Investigação (do inglês *Joint Research Centre* - JRC) desde 2011 (COPERNICUS PROGRAMME, 2022). As bases de dados CORINE e vários dos seus programas foram adotados na maioria dos países da UE, bem como em 13 países parceiros da Europa Central e Oriental (BÜTTNER *et al.*, 2012). Uma delas é um inventário de uso e cobertura do solo em 44 classes, apresentado como produto cartográfico, na escala 1:100.000. As cinco classes de nível 1 são: 1) superfícies artificiais, 2) áreas agrícolas, 3) florestas e áreas seminaturais, 4) pântanos, 5) corpos d'água. Cada classe é detalhada em 3 níveis categóricos (vide o Anexo C para maiores detalhes).

Os índices de Capacidade Biológica Territorial (do inglês *Biological Territorial Capacity* - BTC) atribuídos pela literatura de referência (INGEGNOLI, 2002; GOBATTONI, 2012; INGEGNOLI, 2015) para cada classe de uso e cobertura do solo e utilizados no modelo PANDORA 3.0, consideram a classificação CORINE Land Cover, com maior detalhamento que aquele empregado pelo MapBiomass, ambos em nível categórico 3. Para que fosse possível processar os dados do Projeto MapBiomass no Modelo PANDORA 3.0 foi, então, necessário reclassificar as classes de uso e cobertura adotadas pelo Projeto ao sistema CLC (Tabela 5).

Tabela 5 – Classificação adaptada de tipologias de uso e cobertura do solo observadas na área de estudo.

MapBiomass		CORINE Land Cover		Descrição Adaptada
ID	Descrição	COD	Descrição	
24	Infraestrutura Urbana	111	Tecido urbano contínuo	Infraestrutura Urbana - Ocupação Densa
		112	Tecido urbano descontínuo	Infraestrutura Urbana - Ocupação Dispersa

MapBiomias		CORINE Land Cover		Descrição Adaptada
ID	Descrição	COD	Descrição	
25	Outras Áreas Não Vegetadas	121	Unidades industriais ou comerciais e Instalações Públicas	Unidade Industrial ou Comercial e Instalação Pública
30	Mineração	131	Locais de extração mineral	Mineração
15	Pastagem	231	Pastagens	Pastagem
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	242	Padrões de cultivo complexos	Mosaico de Agricultura e Pastagem
9	Floresta Plantada	244	Áreas Agroflorestais	Floresta Plantada
3	Formação Florestal	311	Floresta de folhas largas	Formação Florestal
4	Formação Savânica	324	Vegetação arbustiva e herbácea de transição	Formação Savânica
29	Afloramento Rochoso	332	Rochas nuas	Afloramento Rochoso
33	Rio, Lago e Oceano	511	Cursos D'Água	Rio
		512	Corpos D'Água	Lago

Fonte: Adaptado pela autora de Projeto MapBiomias (2021b) e Büttner *et al.* (2012).

Dessa forma, dentro das classes identificadas pelo Projeto MapBiomias na área de estudo, apresentadas na Tabela 5, foi realizado desmembramento das classes “Infraestrutura Urbana” (ID 24) e “Rio, Lago e Oceano” (ID 33) do MapBiomias para as classes “Infraestrutura Urbana - Ocupação Densa” (COD 111), “Infraestrutura Urbana - Ocupação Dispersa” (COD 112), “Rio” (COD 511) e “Lago” (COD 512) do CLC, respectivamente. Foi adotada a paleta de cores do CLC para sua representação nos mapas gerados.

A descrição completa das classes de uso e cobertura do solo do CLC está disponível em <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html/index.html> e a do MapBiomias está disponível em: <https://mapbiomas.org/codigos-de-legenda>.

Destaca-se que o CORINE estabelece classes diferentes para as florestas de *Pinus* spp. e de eucalipto. A silvicultura de eucalipto é classificada no COD 311, Formação Florestal. No entanto, neste trabalho optou-se por utilizar a classe descrita no COD 244 (Áreas Agroflorestais) para as florestas de eucalipto, predominantes na região noroeste da área de estudo e utilizadas para produção de carvão vegetal pela ArcelorMittal (NOCELLI, 2016). A identificação e o ajuste das feições de Floresta Plantada foram necessários em função da diferença de aporte de BTC de cada

vegetação indicado na literatura de referência e de sua contribuição para a conectividade da paisagem. O BTC da Mata Atlântica é de 12,8 Mcal/m²/ano e o da Floresta Plantada é de 6,4 Mcal/m²/ano (INGEGNOLI, 2002, INGENNOLI, 2015).

O ajuste em feições obtidas pela vetorização das imagens de uso e cobertura do solo foi realizado por meio de inspeção visual a partir da utilização de imagens de resolução espacial LANDSAT-8 e superior disponíveis nas plataformas Google Earth e Bing, por meio do *plug-in* QuickMapServices (2019) no *software* QGIS 3.16 (2021).

Além da identificação visual, os limites das feições detectadas foram confrontados com as bases disponíveis no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b) para checagem do ajuste realizado.

3.2.1.2 Mapas de Solo

Para elaborar os mapas de solo de Juiz de Fora, foram utilizadas as informações do Mapa de Solos de Minas Gerais (UFV *et al.*, 2010), disponível na IDE-Sisema (SISEMA, 2021), e extraído o recorte do território municipal a partir dos limites constantes do *shapefile* disponível no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b).

Há fortes relações entre as divisões climáticas e divisões fitogeográficas (índices hídricos e térmicos versus tipos de vegetação primária). Condições edafoclimáticas, especialmente relativas aos regimes hídricos, térmicos e de eutrofia e oligotrofia, condicionam fortemente a cobertura vegetal primária. Essas distinções assumem ampla implicação ecológica e podem estabelecer relações entre unidades de solo e sua aptidão agrícola e ecológica (SANTOS *et al.* 2018).

Uma boa qualidade do solo é importante para a preservação de outros serviços ambientais essenciais, incluindo o fluxo e a qualidade da água, a biodiversidade e o equilíbrio de gases atmosféricos. Em grande parte das regiões tropicais e subtropicais, a remoção de nutrientes do solo é mais acelerada em razão das condições de altas temperaturas e do regime de chuvas (LOPES & GUILHERME, 2007). O Brasil apresenta grandes áreas com altas acidez e capacidade de fixação de fósforo (P), além da toxidez por alumínio (Al) (BOT *et al.*, 2000), em função de sua localização tropical, mas o manejo inadequado do solo também é causa importante de sua baixa fertilidade.

As tecnologias inadequadas impostas por colonos europeus contribuíram para que os solos do Brasil se tornassem decadentes. O revolvimento profundo do solo, a exposição ao sol e ao impacto da chuva provocam o adensamento do solo e seu empobrecimento. Com o solo desestruturado, sem permeabilidade, não há infiltração das chuvas, as fontes e rios secam e a vegetação, antes exuberante, perde toda sua força vital (PRIMAVESI, 2016).

Para a classificação dos solos, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) leva em conta dados morfológicos, físicos, químicos, mineralógicos, além de aspectos ambientais do perfil que o representam. A chave de classificação é organizada em 6 níveis categóricos. Os cinco primeiros níveis são denominados de ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos e famílias. O 6º nível categórico (séries) ainda carece de definição (SANTOS *et al.*, 2018).

No primeiro nível categórico (ordem), as 13 classes são: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos.

Os solos presentes na área de estudo são os Latossolos e os Cambissolos e, classificados em 1º, 2º e 3º níveis categóricos, são descritos como Latossolo Amarelo Distrófico (LAd), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd), Cambissolo Háptico Tb Distrófico (CXbd) e o Cambissolo Húmico Distrófico (CHd) (UFV *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2018).

A Saturação por Bases (V%) é excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, utilizada para classificá-los como eutróficos (férteis), quando apresentam altos valores de bases ($V\% \geq 50\%$), e solos distróficos (pouco férteis), que podem ser muito pobres cátions ($V\% < 50\%$), como em Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , e apresentar teor de alumínio trocável em nível tóxico para a vegetação (RONQUIM, 2020).

Genericamente, os Latossolos são predominantes no Brasil e conhecidos popularmente como solos velhos. Possuem boas condições físicas para a agricultura, alta estabilidade, baixo risco de erosão e boa permeabilidade por serem solos bem estruturados e muito porosos, porém têm baixa fertilidade. A correção da acidez, a adubação e, nos climas mais secos, a irrigação em função da exigência dos cultivares são as práticas de manejo recomendadas (SANTOS *et al.*, 2018).

Segundo a mesma fonte, os Latossolos Vermelho-Amarelo (Figura 8) ocorrem em extensas áreas do território nacional associados aos relevos plano, suave

ondulado ou ondulado, sendo predominantes na área de estudo. Muito utilizados para a agropecuária, são muito profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura. Sua porosidade oferece condições adequadas para o desenvolvimento radicular em profundidade. No caso de solos álicos, distróficos ou ácricos, há limitações químicas ao desenvolvimento profundo do sistema radicular e baixa quantidade de água disponível para as plantas. A adubação fosfatada é recomendada. Particularmente, o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico tem baixa fertilidade.

Os Latossolos Amarelos (Figura 9) são solos coesos, normalmente resistentes à erosão, mas a intensa mecanização pode provocar sua compactação, o que os torna mais suscetíveis aos processos erosivos e limita o enraizamento em profundidade quando álico ou distrófico. Este último, de ocorrência na área de estudo, tem a baixa fertilidade como característica (SANTOS *et al.*, 2018).



Foto: Maria de Lourdes Mendonça Brefin



Foto: José Coelho de Araújo Filho

Figura 8 – Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo (Rio Paranaíba/MG). Fonte: SANTOS *et al.* (2018).

Figura 9 – Perfil de Latossolo Amarelo (Arapina/PE). Fonte: SANTOS *et al.* (2018).

Os Cambissolos são comumente encontrados em locais de relevo com declives acentuados, muito susceptíveis à erosão. Não apresentam o horizonte superficial A húmico e têm baixa permeabilidade. Apresentam horizonte B ainda em estágio inicial de formação, com pequena profundidade e pedras na massa do solo, o que limita seu uso (SANTOS *et al.*, 2018). A destinação adequada para esses solos deveria ser a preservação da fauna e flora quando em áreas declivosas. No entanto, é comum sua utilização para o cultivo de pastagem ou silvicultura (LIMA *et al.*, 2007).

Grande parte dos Cambissolos apresenta baixa fertilidade química natural e demanda intenso uso de fertilizantes e corretivos. Como prática de manejo, recomenda-se a correção da acidez, dos teores de alumínio (Al) restritivos ao desenvolvimento das espécies cultivadas e a adubação adequada à lavoura. Quando presente em encostas, é necessária a adoção de práticas conservacionistas, pois são suscetíveis aos processos erosivos.

O Cambissolo Háptico Tb Distrófico (Figura 10) apresenta argila de baixa atividade e de baixa fertilidade e o Cambissolo Húmico Distrófico (Figura 11) tem baixa fertilidade, geralmente ácido, sendo mais utilizado para cultivos de subsistência, pastagem e reflorestamento (SANTOS *et al.*, 2018).



Foto: José Francisco Lumbreras

Figura 10 – Perfil de Cambissolo Háptico (Arraial do Cabo/RJ). Fonte: SANTOS *et al.* (2018).



Foto: Humberto Gonçalves dos Santos

Figura 11 – Perfil de Cambissolo Húmico (Água Doce/SC). Fonte: SANTOS *et al.* (2018).

Destaca-se que tais descrições são generalizações para os atributos mais comuns encontrados nestes solos, de acordo com o SiBCS (SANTOS *et al.*, 2018).

Para este trabalho, considerou-se a fertilidade como a característica física que possibilita a sucessão ecológica da vegetação até níveis de maior diversificação e complexidade, como o estágio de floresta madura, com produção máxima de bioenergia (PELOROSSO *et al.*, 2016). Fatores como a estrutura física, suscetibilidade à erosão, porosidade, acidez e presença de Al foram considerados

para escalonar os solos presentes na área de estudo do mais fértil ao menos fértil, atribuindo-lhes pesos que variam de 0 a 1 (PELOROSSO *et al.*, 2016), conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Atribuição de peso relativo à fertilidade do solo

Tipo de Solo	Peso
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd)	1,0
Latossolo Amarelo Distrófico (LAd)	0,8
Cambissolo Húmico Distrófico (CHd)	0,6
Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd)	0,4

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.1.3 Mapas de Erosão

A erosão é um dos maiores fatores de degradação da qualidade dos solos do planeta e caracteriza, muitas vezes, dano irreparável à sua capacidade produtiva. A exaustão de nutrientes reduz a cobertura vegetal e, com isso, a resistência do solo à erosão (LOPES & GUILHERME, 2007)

Processos erosivos têm origem com o rompimento do equilíbrio natural no solo, em decorrência do efeito das forças advindas de fatores climáticos, mormente pelas precipitações, tanto pelo impacto direto das gotas sobre a superfície do solo quanto por sua capacidade de produzir o escoamento superficial (PRUSKI, 2009). Nesse sentido, solos que possuem entre 30% e 35% de argila são mais resistentes ao impacto das gotas de chuva e, logo, à erosão (RAMIDAN, 2003).

A erodibilidade do solo expressa a maior ou menor facilidade com que suas partículas são desprendidas por um agente erosivo (BASTOS, 1999) e resulta da interação entre as características físicas, químicas, mineralógicas e biológicas do solo. Sobretudo, as características que afetam a permeabilidade do solo e sua maior ou menor capacidade de resistir ao desprendimento e transporte de partículas pela chuva (LOMBARDI NETO & BERTONI, 1975).

A vegetação ou cobertura do solo, embora não seja uma característica intrínseca do substrato, além de ser passível de alterações relativamente rápidas, também desempenha um papel importante na susceptibilidade dos solos aos processos de erosão (VIANA, 2000).

As bases cartográficas utilizadas para a elaboração dos mapas de erosão são parte do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG) (SCOLFORO *et al.*, 2008) e estão disponíveis na IDE-Sisema (SISEMA, 2021). Foi realizada a extração do recorte do território municipal de Juiz de Fora a partir dos limites constantes do *shapefile* disponível no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b).

O mapa de erosão do ZEE-MG foi elaborado pelo Instituto de Gestão das Águas (IGAM) a partir de dados indiretos (produção de sedimentos por área). Foram realizadas 28 coletas anuais entre os anos de 1999 a 2003 e coletados dados de cerca de 300 bacias hidrográficas. Como indicadores de erosão foram avaliados a concentração de sedimentos nos cursos d'água, a vazão e a área de contribuição a montante do ponto amostral. Dessa forma, calculou-se a quantidade de sedimentos transportados em t/ha/ano (SCOLFORO *et al.*, 2008). As taxas de produção de sedimentos foram classificadas em cinco categorias qualitativas: Muito Baixa; Baixa; Média; Alta; Muito Alta.

Para este trabalho, considerou-se a erosão como fator limitante para a sucessão ecológica da vegetação e sua intrínseca produção máxima de bioenergia (INGEGNOLI, 2015). Desta forma, atribuiu-se pesos que variam de 0 a 1 de acordo com o grau de erosão do solo, em adaptação ao proposto por Pelorosso *et al.* (2016), conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Pesos da erosão do solo

Erodibilidade	Peso
Baixa	1,00
Média	0,75
Alta	0,50
Muito Alta	0,25

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.1.4 Mapas de Distribuição de Umidade

Os mapas de distribuição de umidade foram elaborados utilizando-se informações do Mapa Clima do Brasil (IBGE, 2002), disponibilizadas para o Estado de Minas Gerais na IDE-Sisema (SISEMA, 2021). O recorte do território municipal de Juiz

de Fora/MG foi realizado a partir dos limites constantes do *shapefile* disponível no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b).

A classificação climática oficialmente utilizada pelo IBGE se baseia naquela desenvolvida por Nimer em 1974, publicada na Revista Brasileira de Geografia do IBGE em 1979, e com representação da classificação adaptada pelo Instituto em 2002 sem interferência nos limites das unidades ou atualização dos dados (IBGE, 2022c).

Baseado na integração de métodos quantitativos e de dinâmica atmosférica, Nimer utilizou três sistemas de classificação climática independentes e que se superpõem (NASCIMENTO *et al.*, 2016). O resultado da classificação compõe diversas regiões climática e ecologicamente distintas.

O primeiro sistema, fundamentado na identificação dos padrões de circulação atmosférica e seu fator genético-dinâmico que controla o regime climático anual, define os 3 climas zonais (Equatorial, Tropical e Temperado). O Clima Tropical subdivide-se em 3 subunidades regionais (Zona Equatorial, Nordeste Oriental e Brasil Central).

As regiões térmicas (Mesotérmico Mediano e Brando, Subquente e Quente) são delimitadas pelo segundo sistema de classificação fundamentado na frequência e médias dos valores extremos mensais de temperatura.

O terceiro sistema classifica as regiões em escala de umidade, que varia do Superúmido ao Semiárido. São relacionados o número de meses secos e o tipo de vegetação natural predominante com a finalidade de expor a interação do regime climático com a biogeografia e a ecologia (IBGE, 2002).

A área de estudo está inserida na Zona Climática Tropical Brasil Central. As tipologias climáticas e os pesos atribuídos a cada uma, variando de 0 a 1 de acordo com o número de meses secos (GOBATTONI *et al.*, 2014; PELOROSSO *et al.*, 2016), são detalhadas na Tabela 8:

Tabela 8 – Tipologias climáticas do município de Juiz de Fora

Umidade	Distribuição da Umidade	Temperatura	Descrição completa	Peso
Úmido	1 a 2 meses secos	Mesotérmico brando - média entre 10 e 15° C	Tropical Brasil Central, mesotérmico brando - média entre 10 e 15° C, úmido 1 a 2 meses secos	0,5
Úmido	3 meses secos	Subquente - média entre 15 e 18 ° em pelo menos 1 mês	Tropical Brasil Central, subquente - média entre 15 e 18 ° C em pelo menos 1 mês úmido e 3 meses secos	0,3

Umidade	Distribuição da Umidade	Temperatura	Descrição completa	Peso
Semi-úmido	4 a 5 meses secos	Subquente - média entre 15 e 18 ° em pelo menos 1 mês	Tropical Brasil Central, subquente - média entre 15 e 18 ° C em pelo menos 1 mês, semi-úmido 4 a 5 meses secos	0,2

Fonte: Adaptado de IBGE (2002) e IDE-Sisema (SISEMA, 2021).

3.2.1.5 Mapas das Unidades Bioenergéticas da Paisagem

Para elaborar os mapas das Unidades Bioenergéticas da Paisagem (BELU) foram utilizadas as seguintes bases cartográficas: limites municipais e áreas protegidas disponíveis no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b); Bacia Hidrográfica Ottocodificada do Rio Paraíba do Sul (IGAM, 2020) e trechos rodoviários disponíveis na IDE-Sisema (SISEMA, 2021). O recorte territorial das bases cartográficas foi realizado a partir dos limites municipais constantes do *shapefile* disponível no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora.

As BELUs são porções da paisagem que apresentam características de homogeneidade variáveis em termos de uso e cobertura do solo, os biótopos, cercadas por barreiras significativas e reconhecíveis para os fluxos da bioenergia (GOBATTONI *et al.* 2011; GOBATTONI *et al.*, 2014; PELOROSSO *et al.*, 2016).

Assim, uma BELU pode ser composta por um mosaico de diferentes tipos de classes de uso e cobertura do solo, desde pastagens e florestas até áreas totalmente impermeabilizadas. Cada uma dessas classes aporta ao sistema determinada Capacidade Biológica Territorial (BTC), dada em Mcal/m²/ano (INGEGNOLI, 2002, INGENGOLI, 2015) e contribui para definir o nível de bioenergia da BELU da qual faz parte.

Em áreas urbanas geralmente predominam as barreiras representadas por rodovias, ferrovias e áreas construídas ou impermeabilizadas, capazes de limitar fortemente a dispersão de animais, sementes e pólen. Nas áreas periurbanas, além das vias do sistema de transporte, são barreiras comuns os rios, zonas altimétricas, áreas urbanas de menor adensamento.

Dessa forma, a delimitação de BELUs depende da quantidade de barreiras significativas e da área mínima definida para cada uma delas (GOBATTONI *et al.*,

2014). Nas áreas próximas às cidades, em geral, as BELUs apresentam menor área devido à maior concentração de vias de acesso e áreas impermeabilizadas.

A integração de informações de conectividade em diferentes escalas de planejamento territorial, como municipal, metropolitana e microrregional, por exemplo, pode ser facilitada ao se optar por trabalhar em escala de unidades de paisagem definidas por tais barreiras facilmente reconhecíveis (PELOROSSO *et al.*; 2012).

Para delimitar as BELUs da área de estudo, foram utilizados o mapa de uso e cobertura do solo elaborado em etapa anterior e as camadas temáticas hidrografia, trechos rodoviários e Unidades de Conservação.

A camada temática relativa ao transporte ferroviário (IBGE, 2021a) não foi utilizada neste trabalho. Verificou-se que a linha férrea presente na área de estudo em geral percorre o território acompanhando o traçado de outras barreiras importantes, como rodovias ou as margens de rio principal, além de inserida na malha urbana. Dessa forma, optou-se por desconsiderá-la como barreira na definição dos limites das BELUs.

Além das barreiras acima referidas, considerou-se para a individualização de BELUs, as áreas verdes urbanas com mais de 3 hectares e os espaços naturais protegidos, independentemente de sua área, de sua esfera administrativa ou de sua classificação vinculada ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Lei Federal n.º 9.985, de 18 de julho de 2000). O objetivo foi quantificar a contribuição individual de cada área para a bioenergia do sistema e se seriam afetadas pelas alterações propostas para as simulações dos Cenários Alternativos 1 e 2 (restauração de APPs e depleção da qualidade da vegetação de áreas sob pressão de urbanização).

Áreas com uso de infraestrutura urbana com ocupação dispersa foram individualizadas em BELUs quando apresentavam área total maior que 30 hectares e áreas construídas com grau de impermeabilização do solo significativo.

Cada BELU foi identificada por um número e nomeada de acordo sua localização ou denominação do espaço natural protegido e calculada sua área e perímetro (vide Anexo D para mais detalhes).

Os fluxos de bioenergia entre BELUs adjacentes são calculados pelo PANDORA considerando a permeabilidade e o comprimento das barreiras de separação entre elas, bem como a bioenergia produzida pela vegetação e condicionada pelas variáveis ambientais anteriormente mencionadas.

Foram adotados os seguintes valores de permeabilidade para cada tipo de barreira (Tabela 9).

Tabela 9 – Permeabilidade das barreiras selecionadas

Base Cartográfica	Barreira	Permeabilidade
Uso e ocupação do solo	Infraestrutura Urbana - Ocupação Densa	0.05
	Infraestrutura Urbana - Ocupação Dispersa	0.50
	Infraestrutura Urbana - Ocupação Densa e Dispersa	0.30
Trechos rodoviários	Rodovia de Pista Dupla	0.05
	Rodovia de Pista Simples - Trafego Intenso	0.50
	Rodovia de Pista Simples - Trafego Moderado	0.70
	Estrada Vicinal	0.90
Bacia hidrográfica	Rio Principal	0.85
	Rio Secundário	0.90
	Rio com Borda Cimentada	0.40
Espaços Naturais Protegidos	Interface Formação Florestal-Pastagem	0.90
	Interface Formação Florestal - Formação Florestal	1.00

Fonte: Adaptado de Gobattoni *et al.* (2011 e 2012).

Devido à opção de se individualizar os espaços naturais protegidos e as áreas verdes urbanas, algumas barreiras apresentaram características híbridas entre a infraestrutura urbana de ocupação densa e dispersa uma vez que algumas dessas BELUs localizam-se em áreas de transição entre o tecido urbano e as áreas rurais ou de expansão urbana municipal. Para os espaços naturais protegidos com interface com áreas de pastagem, definiu-se o índice da permeabilidade em 0.90, uma vez que apesar de tratar-se de vegetação, este tipo de cobertura pode caracterizar-se fator limitante para a dispersão de algumas espécies animais e vegetais.

Ressalta-se também que, a depender do tráfego relativo à sua localização, foram atribuídos valores de permeabilidade diferentes a trechos de uma mesma rodovia (quando o trecho está localizado mais próximo à área urbana, por exemplo, quando funciona como via coletora centrípeta).

3.3 DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Para a realização desta etapa dos trabalhos consultou-se o Plano Diretor do município de Juiz de Fora, estabelecido pela Lei Complementar nº 82, de 03 de julho de 2018 e suas alterações (disponível em https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/plano_diretor/pdp_lc82.18_00.pdf) (JUIZ DE FORA, 2018a) para identificação das áreas consideradas prioritárias para a proteção dos mananciais de abastecimento público.

O Plano Diretor estabelece em seu Art. 66 a Macroárea de Interesse Ambiental e de Preservação dos Mananciais (MA3):

“A Macroárea de Interesse Ambiental e de Preservação dos Mananciais - MA3 abrange a porções do território correspondentes às bacias de contribuição dos mananciais de abastecimento público da *Represa Dr. João Penido, do Ribeirão Espírito Santo e da bacia do Ribeirão Estiva*, sendo caracterizada pela existência de esparsos fragmentos de vegetação nativa, entremeados por atividades agropecuárias, sítios e chácaras de recreio que impactam, em graus distintos, a qualidade dos recursos hídricos e da biodiversidade, que demandam critérios específicos para ocupação...” (JUIZ DE FORA, 2018a, grifo nosso)

Os incisos de I a V do Art. 67 da mesma lei estabelecem os objetivos da MA3:

I - recuperar, conservar e proteger os mananciais de abastecimento público da cidade de Juiz de Fora;
 II - recuperar, conservar e proteger as bacias hidrográficas com potencial para futuros mananciais de abastecimento público da cidade de Juiz de Fora;
 III - aumentar as áreas florestadas;
 IV - conter a expansão urbana;
 V - coibir os usos e atividades efetivas ou potencialmente poluentes, de acordo com a DN COPAM nº 74/2004 e suas alterações.” (JUIZ DE FORA, 2018a)

Adicionalmente, foi selecionada como objeto de estudo a Macrozona do Eixo do Paraibuna (MZP), integrante da Macroárea de Requalificação, Consolidação e Expansão Urbana. O Rio Paraibuna representa o grande eixo histórico (LESSA, 1985) e atual de articulação do desenvolvimento municipal:

“A Macrozona do Eixo do Paraibuna - MZP se desenvolve ao longo do Rio Paraibuna, compreendendo uma faixa linear de dimensões variadas e caracterizada pela existência de vias municipais estruturais,

da via férrea, de rodovias estaduais e federais, que articulam diferentes municípios, de numerosos bairros de predominância residencial e de alguns polos de empregos, apresenta processos de transformação econômica e de padrões de uso e ocupação do solo que necessitam de estímulo e regulamentação pelo seu grande potencial urbanístico e de equilíbrio na relação entre emprego e moradia.” (JUIZ DE FORA, 2018a)

Nas alíneas a e b do Inciso I do Art. 48 da mesma Lei Complementar são estabelecidos os objetivos relacionados ao fornecimento de Serviços Ecossistêmicos importantes para a população da área urbana:

“a) estimular a criação de áreas verdes e espaços de uso público de caráter institucional, cultural e de lazer;
b) requalificar as margens do Rio Paraibuna, destinando-as ao uso público de esporte e lazer, entre outros.” (JUIZ DE FORA, 2018a)

Dessa forma, optou-se por quantificar o efeito da restauração de parte da APP do rio Paraibuna para a conectividade do sistema e, conseqüentemente, para o fornecimento de Serviços Ecossistêmicos à população.

As bases cartográficas da Bacia Hidrográfica Ottocodificada do Rio Paraíba do Sul (IGAM, 2020) e Massas D'Água do Brasil (ANA, 2019), disponíveis na IDE-Sisema (SISEMA, 2021), e limites da Macroárea MA3 e da Macrozona MZP, disponíveis no Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b), foram interseccionadas para recortar os corpos hídricos presentes nas áreas selecionadas.

Em seguida, foram identificadas as nascentes dos corpos d'água e traçados *buffers* de largura variada nas margens dos corpos d'água e das nascentes, representando a faixa de Área de Preservação Permanente (APP), de acordo com o estabelecido na Lei Federal n.º 12.651, de 25 de maio de 2012, conhecida como “novo Código Florestal”. Os *buffers* foram traçados com o auxílio de algoritmo disponível no QGIS (2021) para tal finalidade.

As faixas de APP estabelecidas foram, então, interseccionadas com o mapa base de uso e cobertura do solo de modo que fosse possível identificar as classes de uso e cobertura atualmente presentes nas áreas. A partir daí as feições com vegetação presentes nos *buffers* de entorno dos corpos hídricos e cujas classes de cobertura fossem diferentes de Formação Florestal, foram reclassificadas manualmente até que 30% da área total das APP estivessem com a representação florestal (CA2). O mesmo procedimento foi realizado para a elaboração de outro mapa

com a representação de 70% da área total de APPs com Formação Florestal (CA3). Para a elaboração do mapa com pastagem em 100% da APP (CA1), foram selecionados todos os biótopos com tipologias vegetacionais e foram reclassificados como pastagem.

Assim, foram utilizados 4 mapas de uso e cobertura de solo para a simulação do efeito da restauração florestal no município:

1 – O mapa que retrata a condição real da área, utilizado como parâmetro da medida de Bioenergia Generalizada disponível;

2 – O mapa com representação de 100% das Áreas de Preservação Permanente coberta por pastagem (CA1);

3 – O mapa com representação de 30% das Áreas de Preservação Permanente com floresta (CA2);

4 – O mapa com representação de 70% das Áreas de Preservação Permanente com floresta (CA3).

Os cálculos das variáveis ambientais $K_{ecótono}$, $K_{vegetação}$ e do parâmetro K_{mean} resultante foram ajustados para os mapas de simulação dos 3 cenários alternativos. As demais variáveis não sofreram alteração em seus valores por não serem influenciados pela vegetação.

Após os ajustes necessários, foram realizadas as simulações com os 4 mapas base relacionados acima, utilizando-se o PANDORA 3.0 e obtidos os Índices de Bioenergia de cada fragmento, das BELUs individualmente e de todo o sistema, além dos fluxos energéticos entre as unidades territoriais e evolução da bioenergia do sistema. Dessa forma, os dados foram obtidos para o cenário real e para os 3 cenários alternativos.

3.4 O MODELO PANDORA 3.0

O Modelo PANDORA foi desenvolvido para atender às necessidades dos gestores envolvidos no procedimento de avaliação ambiental do planejamento territorial como um sistema de apoio à avaliação do impacto de diferentes cenários de mudanças no uso da terra. PANDORA quantifica a energia produzida pela vegetação (bioenergia) e seus fluxos entre unidades da paisagem (BELUs). Cada fragmento do mosaico da paisagem contribui para a conectividade estrutural global da paisagem (Conectividade da Paisagem Bioenergética, do inglês *Bio-Energy Landscape*

Connectivity – BELC) e, conseqüentemente, para a funcionalidade e resiliência de todo o sistema a que pertence.

A energia considerada pelo modelo está ligada ao metabolismo da vegetação, indicada por meio do índice Capacidade Biológica Territorial, proposto por Ingegnoli (2002) e Ingegnoli (2015). Um valor de BTC é atribuído para cada tipo de vegetação, com base em dados específicos disponíveis na literatura ou baseado em avaliação direta no campo e refere-se ao fluxo de energia que um sistema ecológico deve dissipar no meio ambiente para manter seu nível de metaestabilidade (ou estabilidade dinâmica) em termos de funcionalidade e resiliência (BRUNSELL *et al.*, 2011, GOBATTONI *et al.*, 2011). Quanto maior a metaestabilidade de um sistema, maior sua resistência a distúrbios.

A evolução de cada fragmento e das unidades da paisagem é regulada pela capacidade de produção de bioenergia da vegetação e pelas barreiras dentro e entre as BELUs. Ao se alterar o uso e cobertura do solo, adicionar ou remover barreiras ao fluxo de energia, representadas por rodovias, áreas urbanas, ferrovias, rios, relevo dentre outros, a depender das características de cada paisagem, altera-se a quantidade de bioenergia disponível para troca e o fluxo de energia se movimenta até que o sistema encontre o novo equilíbrio dinâmico da bioenergia.

A bioenergia de cada BELU é definida como a Bioenergia Generalizada (Mi), aquela disponível para troca, ou a necessária para estabelecer os fluxos de bioenergia entre BELUs (GOBATTONI *et al.*, 2011). O conjunto das Bioenergias Generalizadas (Mi) de cada BELU e o fluxo de bioenergia entre BELUs adjacentes formam o Gráfico de Bioenergia da Paisagem (do inglês *Bio-Energy Landscape Graph* – BELG), composto por nós e arcos. O PANDORA 3.0 atribui valores relativos de bioenergia a cada nó, representado por círculo, e a cada arco, representado por traço, do BELG. O gráfico pode ser exibido com as dimensões proporcionais à bioenergia de cada BELU.

O modelo obtém indicadores que descrevem a conectividade da paisagem: (i) o índice de bioenergia (M), expresso em Mcal/ano, descreve a energia que o sistema ecológico precisa dissipar para manter seu nível de metaestabilidade (GOBATTONI *et al.*, 2011); (ii) os fluxos de energia (Mcal/ano) entre BELUs adjacentes evidenciam o nível de conectividade da paisagem da unidade de paisagem de bioenergia (PELOROSSO *et al.*, 2017); e (iii) o índice dMt_{tot} (%) indica a importância da conectividade de cada biótopo. Adicionalmente, a análise dos padrões estruturais do

BELG oferece informações que permitem a compreensão dos processos que moldam os sistemas ecológicos e de como suas partes em interação respondem às alterações da cobertura e uso do solo (GOBATTONI *et al.*, 2014; PELOROSSO *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2018; GUIMARÃES, 2020; MONACO *et al.*, 2020; PELOROSSO *et al.*, 2021). A paisagem é considerada, então, um sistema único, que responde às leis da termodinâmica, em estado de busca contínua pelo equilíbrio metaestável como consequência das mudanças nos padrões de uso do solo e das barreiras instaladas.

Para avaliar a evolução da Bioenergia da Paisagem, o PANDORA utiliza um modelo Lotka-Volterra (MATSUDA *et al.*, 2013), com Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) e uma lei de equilíbrio entre o crescimento logístico da energia e sua redução provocada por fatores limitantes aos fluxos energéticos, as barreiras naturais ou antrópicas.

Pandora aplica uma solução de hierarquia algébrica até que um valor matemático de equilíbrio (ou assintótico) da bioenergia seja alcançado para cada fragmento j que pertence a uma $BELU_i$. Áreas de altos valores de Bioenergia Assintótica indicam alta qualidade ecológica do sistema e as regiões mais importantes para a conectividade da paisagem (GOBATTONI *et al.*, 2011; GOBATTONI *et al.*, 2014 e PELOROSSO *et al.*, 2016). A bioenergia pode ser, então, utilizada como indicador da produção e fluxo de Serviços Ecossistêmicos no sistema (PELOROSSO *et al.*, 2014).

A Bioenergia Assintótica da $BELU_i$ (M^{as}_i) é derivada da Bioenergia Assintótica das manchas j , ajustada por variáveis ambientais K específicos que, como as barreiras, também podem variar de acordo com as características da paisagem em análise. Em geral, as variáveis estão relacionadas aos ecótonos das manchas, condições climáticas (distribuição da umidade e insolação), altimetria, tipo de solo do $BELU_i$ (GOBATTONI, *et al.*, 2014; PELOROSSO *et al.*, 2016). Neste trabalho foram utilizadas as variáveis ecótonos, distribuição da umidade, solo, além da variável cobertura vegetal, proposta por Wanghe *et al.* (2019). Adicionalmente, propomos o uso da variável erosão, baseado no trabalho desenvolvido por Pelorosso *et al.* (2016) para a variável solo.

Para a obtenção de todos os valores assintóticos (valores matemáticos de equilíbrio) de bioenergia foi utilizado o valor de 200 iterações computacionais, que buscam representar o número de passos temporais. Ou seja, quando $t = 200$, o valor assintótico foi alcançado.

Para realizar as modelagens no PANDORA 3.0, processado no software QGIS 2.16 (2016), foram elaborados os mapas base de uso e cobertura do solo, os mapas das variáveis ambientais (mapas de solo, erodibilidade, distribuição de umidade), mapas das Unidades Bioenergéticas da Paisagem (BELUs), de acordo com as barreiras identificáveis na paisagem, e calculados os valores das variáveis ambientais.

Os valores de BTC utilizados neste trabalho para cada classe de uso e cobertura do solo foram adaptados na base de dados SQLite (HIPP, 2020) utilizada pelo PANDORA 3.0 de modo a adequá-lo à utilização para zonas tropicais (maiores detalhes podem ser encontrados no Anexo A).

3.5 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Para a obtenção dos valores das variáveis ambientais utilizadas pelo modelo PANDORA 3.0 foram utilizadas as equações descritas a seguir e os dados geoestatísticos obtidos pelo processamento das informações constantes dos mapas base de uso e cobertura do solo, tipos de solo, erosão e distribuição de umidade. Os cálculos foram realizados utilizando-se planilha eletrônica (MICROSOFT EXCEL, 2015).

A bioenergia da BELU_i (M_i) no tempo (t) é calculada de acordo com:

$$M_i(t) = (1 + K_i) \times B_i(t) \quad (I)$$

que depende dos seguintes valores:

$$B_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} B_{ji}(t) \times S_{ji} \quad (II)$$

Onde:

B_{ji}(t) é o índice BTC (Mcal/m²/ano) do fragmento j na BELU_i no tempo t; e

S_{ji} é a área do fragmento j na BELU_i.

O parâmetro K-mean da BELU_i (K_i) é dado por:

$$K_i = \frac{(K_i^{ec} + K_i^{sl} + K_i^{er} + K_i^{um} + K_i^{ve})}{5} \in [0,1] \quad (III)$$

Para este trabalho, o parâmetro $K\text{-mean}_i$ depende dos parâmetros K_i^{ec} , K_i^{sl} , K_i^{er} , K_i^{um} e K_i^{ve} que variam de 0 a 1 e descrevem as variáveis ambientais ecótopo, solo, erosão, distribuição de umidade ao longo do ano e vegetação, respectivamente.

Os parâmetros K_i^{ec} e K_i^{sl} foram propostos por Gobattoni *et al.* (2014) e Pelorosso *et al.* (2016). O parâmetro K_i^{er} é proposto neste trabalho, enquanto o K_i^{um} foi adaptado para as condições climáticas tropicais a partir de Gobattoni *et al.* (2014). O parâmetro K_i^{ve} foi adaptado para as condições locais a partir do índice de cobertura da vegetação proposto por Wanghe *et al.* (2019).

3.5.1 Cálculo dos valores de $K_{ecótopo}$

Os valores de $K_{ecótopo}$ são calculados por:

$$K_i^{ec} = 1 - \frac{P_i}{\sum_{j=1}^{m_i} P_{ji}} \quad (IV)$$

Onde:

P_i é o perímetro da BELU_i;

P_{ji} é o perímetro do fragmento j pertencente à BELU_i, e

m_i representa o número de fragmentos j dentro da BELU_i.

Para o cálculo do K_i^{ec} não foram incluídos os parâmetros dos biótopos de valor de BTC igual a zero, conforme indicado por Gobattoni *et al.* (2014).

Aqui, foi realizada uma adaptação do modelo às regiões tropicais. Para os corpos hídricos de regiões temperadas o valor de BTC é igual a 0,3 quando lênticos e zero quando lóticos (INGEGNOLI, 2015). Em função das características do metabolismo dos corpos hídricos nas regiões tropicais, tais valores foram invertidos. A amplitude desses valores de BTC foi mantida, mesmo que as características dos corpos hídricos tropicais sejam bastante diversas daqueles de regiões temperadas,

uma vez que ainda não há pesquisas desenvolvidas em zonas tropicais que estimem tais valores.

3.5.2 Cálculo dos valores de K_{Solo}

Os valores de K_{Solo} são calculados por:

$$K_i^{sl} = \frac{\sum_{f=1}^F w_f x a_{fi}}{A_i} \quad (V)$$

Onde:

w_f é o peso atribuído a cada tipo de solo de acordo com sua fertilidade;

a_{fi} é a área do fragmento dentro da $BELU_i$ que tem o tipo de solo f ; e

A_i é a área da $BELU_i$.

Os pesos atribuídos a cada tipo de solo segundo sua fertilidade constam da Tabela 6.

3.5.3 Cálculo dos valores de $K_{\text{erosão}}$

Os valores de $K_{\text{erosão}}$ são calculados por:

$$K_i^{er} = \frac{\sum_{e=1}^E w_e x a_{ei}}{A_i} \quad (VI)$$

Onde:

w_e é o peso atribuído a cada condição do solo, de acordo com seu grau de erosão;

a_{ei} é a área do fragmento dentro da $BELU_i$ que tem o grau de erosão e ; e

A_i é a área da $Belu_i$.

Os pesos atribuídos a cada tipo de solo segundo sua fertilidade constam da Tabela 7.

3.5.4 Cálculo dos valores de K_{umidade}

Os valores de K_{umidade} são calculados por:

$$K_i^{um} = \frac{(w_1 A_i^h + w_2 A_i^u + w_3 A_i^{sh})}{A_i} \quad (\text{VII})$$

Onde:

A_i^h, A_i^u e A_i^{sh} são as somas das áreas de todos os biótopos caracterizados, respectivamente, na distribuição de umidade como úmido com 1 a 2 meses secos, úmido com 3 meses secos e sub-úmido com 4 a 5 meses secos de acordo com a classificação adotada pelo IBGE (2002);

w_1, w_2 e w_3 são os pesos atribuídos a cada tipologia climática, variando de 0 a 1, de acordo com o número de meses secos, conforme detalhado na Tabela 8. A somatória dos pesos de w_1, w_2 e $w_3 = 1$;

A_i é a área da BELU_i.

3.5.5 Cálculo dos valores de $K_{\text{vegetação}}$

Os valores de $K_{\text{vegetação}}$ são calculados por (WANGHE *et al.*, 2019):

$$K_i^{ve} = \frac{W_1 A_i^n + W_2 A_i^p + W_3 A_i^{non} + \sum_{r=1}^R w_r a_{ri}}{2A_i} \quad (\text{VIII})$$

Onde:

A_i^n, A_i^p e A_i^{non} indicam áreas de formações florestais naturais, florestas plantadas e áreas não florestadas, respectivamente;

W_1, W_2 e W_3 são os pesos de cada formação. Os pesos variam de 0 a 1, escalonados de acordo com o BTC característico de cada uma e foram definidos como 1,0 (W_1), 0,8 (W_2) e 0,5 (W_3);

w_r descreve a taxa de cobertura de cada tipo de vegetação e varia de 0 a 1;

a_{ri} é área da BELU_i coberta com a taxa de cobertura vegetal r .

Os dados de cobertura vegetal necessários para o cálculo desta etapa foram obtidos a partir do mapa de uso e cobertura do solo elaborado em etapa anterior.

O índice $K_{cobertura}$ que avalia o estado de conservação dos diferentes perfis florestais, graduando-os do mais alto grau de conservação ao não conservado (WANGHE *et al.*, 2019) não foi utilizado, pois não é objetivo deste trabalho realizar avaliação de campo para checagem do estado de conservação das manchas florestais, tampouco a resolução das imagens utilizadas permite tal inferência com a acurácia desejável.

Os mapas base de uso e cobertura do solo, utilizado para o cálculo do $K_{ecótopo}$ e do $K_{vegetação}$, tipo de solo, erosão e distribuição de umidade foram, então, interseccionados pelos limites das BELUs definidas. Desse modo, foi possível obter os valores individualizados das variáveis ambientais ($K_{ecótopo}$, K_{solo} , $K_{erosão}$, $K_{umidade}$ e $K_{vegetação}$) para cada BELU que, combinados aos dados de uso e cobertura do solo, são necessárias para que o modelo PANDORA 3.0 calcule a bioenergia de cada fragmento de vegetação, de cada BELU, do sistema e sua evolução no sistema.

3.6 ÍNDICE DE BIOENERGIA DO ECOSISTEMA

Após a obtenção da bioenergia de cada BELU, conforme descrito nos itens anteriores, o PANDORA calcula a bioenergia do ecossistema (M_{tot}) no tempo (t) de acordo com a seguinte equação:

$$M_{tot}(t) = \sum_{i=1}^n M_i(t) \quad (IX)$$

Onde:

n é o número de BELUs em todo o sistema.

M_i é dado pela Eq. I.

3.7 GRÁFICO DE FLUXO DE BIOENERGIA ENTRE BELUS (BELG)

O gráfico de fluxo de bioenergia (Mcal/ano) entre as $BELU_i$ e $BELU_k$ adjacentes é obtido por:

$$\varphi_{ik}(t) = \frac{M_i(t) + M_k(t)}{2x(P_i + P_k)} \sum_{r=1}^s L_{ik}^r p^r \quad (\text{X})$$

Onde:

P_i e P_k são os perímetros das $BELU_i$ e $BELU_k$, respectivamente.

L_{ik}^r é o comprimento da porção r da borda entre a $BELU_i$ e a $BELU_k$;

p^r é o índice de permeabilidade da borda ao fluxo de energia, estabelecida neste trabalho para cada barreira de acordo com a Tabela 9.

3.8 EVOLUÇÃO DA ENERGIA DA PAISAGEM

O PANDORA simula o índice BTC até que os valores assintóticos sejam alcançados. Então, o modelo fornece o valor final do BTC do patch j em $BELU_i$ (B_{ji}^{as}):

$$B_{ji}(t_s) = \frac{c_i(t_{s-1}) - h_i U_i}{d_{ji}(t_{s-1}) e^{[-(c_i(t_{s-1}) - h_i U_i) \Delta t] + c_i(t_{s-1})}} \quad (\text{XI})$$

Onde:

$$d_{ji}(t_{s-1}) = \frac{c_i(t_{s-1}) - h_i U_i - c_i(t_{s-1}) B_{ji}(t_{s-1})}{B_{ji}(t_{s-1})} \quad (\text{XII})$$

O índice de conectividade $c_i(t)$ no tempo (t) é dado por:

$$c_i(t) = \frac{\varphi_1(t)}{\varphi_i^{max}} \quad (\text{XIII})$$

Em que:

$$\varphi_i(t) = \sum_{k_{ii}} \varphi_{ik} \quad (\text{XIV})$$

$$\varphi_i^{max} = \sum_{k_{ii}} \frac{B_{max} A_i + B_{max} A_k}{2(P_i + P_k)} L_{ik} \quad (\text{XV})$$

Onde:

B_{ji} é a bioenergia relacionada ao metabolismo da vegetação presente nos fragmentos de cobertura j da BELU_i; A evolução de B_{ji} (t_s) é regulada por seu nível anterior de bioenergia no momento (t_s-1);

h_i é a razão entre a soma dos perímetros das áreas zero-BTC e todo o perímetro P_i da BELU_i;

$U_i \in [0,1]$, é a porcentagem de todas as áreas zero BTC pertencente à BELU_i.

φ_i é o fluxo total de bioenergia entre a BELU_i e suas BELUs adjacentes;

c_i é o índice de conectividade, definida pela taxa entre $\varphi_1(t)$ e φ_i^{max} ;

k_{ii} indica todas as BELUs vizinhas da BELU_i.

3.9 CÁLCULO DA BIOENERGIA GENERALIZADA (GBE)

A Bioenergia Generalizada (do inglês *Generalized Biological Energy* – GBE) é a energia disponível para troca no sistema geral, $M^{as\ tot}$, é calculada como a soma dos M_i^{as} de todas as BELUs (PELOROSSO *et al.*, 2021).

A Bioenergia Generalizada da BELU (M_i^{as}) e a escala global do ecossistema no estado de equilíbrio metaestável ($M^{as\ tot}$) são dados por:

$$M_i^{as} = \left(\sum_{j=1}^{m_i} B_{ji}^{as} \times 12,8 \times S_{ji} \right) \times (1 + K_i) \quad (\text{XVI})$$

$$M^{as\ tot} = \sum_{i=1}^n M_i^{as} \quad (\text{XVII})$$

Onde:

S_{ji} é a área dos fragmentos de cobertura j da BELU_i;

Para este trabalho o parâmetro BTC máximo no modelo (PELOROSSO *et al.*, 2016) foi ajustado para 12,8 Mcal/m²/ano, que representa o valor máximo de bioenergia produzida pela vegetação típica da Mata Atlântica de ocorrência na área em análise.

O índice $dMtot_{kj}$ indica a importância de cada fragmento j de cobertura k em termos de sua contribuição para a manutenção do BELC, comparando a diferença da

conectividade geral antes ($M^{as\ tot_j}$) e depois ($M^{as\ tot_j^i}$) da alteração do fragmento e é calculado por:

$$dM_{tot_{kj}} = \left(\frac{M^{as\ tot_j} - M^{as\ tot_j^i}}{M^{as\ tot_j}} \right) \times 100 \quad (XVIII)$$

Onde:

$dM_{tot_{kj}}$ é a Bioenergia Generalizada do sistema global

$M^{as\ tot_j}$ é a Bioenergia Generalizada do sistema global que considera os valores assintóticos de todas as manchas j sob as barreiras existentes aos fluxos de energia e variáveis ambientais consideradas;

$dM_{tot_{kj}}$ varia entre 0 e 100, sendo 100 a redução total da conectividade após a impermeabilização do fragmento.

Os fundamentos teóricos, o método e as equações utilizadas pelo modelo são detalhados em Pelorosso *et al.* (2016), Gobattoni *et al.* (2011, 2012 e 2014).

3.10 ANÁLISE DA ESTRUTURA DO BELG

Compreender os princípios de estrutura de rede é essencial para a ecologia, pois padrões de interação influenciam e são influenciados por numerosos processos evolutivos e ecológicos (LOEUILLE, 2010; KAISER-BUNBURY *et al.*, 2017).

Características estruturais das redes podem explicitar padrões, suas propriedades e de seus componentes, o papel de cada elemento em relação à rede e, ainda, os efeitos imediatos e remotos de alterações que se difundem nos sistemas ecológicos.

A forma como uma rede se estrutura pode afetar o fluxo de energia e matéria nos ecossistemas (MEYSMAN & BRUERS, 2010; GUIMARÃES, 2020). A análise da energia nos ecossistemas demonstra como várias características dos sistemas ecológicos podem ser explicadas usando uma descrição generalizada da estrutura da rede (ODUM, 1969).

Para realizar a análise exploratória preliminar do BELG utilizou-se o software Gephi (BASTIAN *et al.*, 2009) que permite a estruturação, visualização e manipulação de redes complexas de modo a revelar padrões.

Para a análise da disposição da rede, foi utilizado o algoritmo Yifan Hu (HU, 2005), modelo de atração-repulsão que combina a técnica de Barnes e Hut Octree, eficiente na aproximação de força de curto e longo alcance, com uma abordagem multinível. O algoritmo proporciona gráficos visualmente eficientes para a análise de dados.

Para o cálculo da partição da rede, com a finalidade de detectar comunidades ou *clusters*, utilizou-se o Algoritmo de Leiden (TRAAG *et al.*, 2019), com os parâmetros função de qualidade definido em modularidade, resolução de 0,5, 100 iterações, 2 reinicializações e 0 para semente aleatória. O Algoritmo de Leiden oferece alta qualidade de conexão entre as comunidades, em que todos os subconjuntos de todas as comunidades são localmente designados de maneira ótima.

Foram calculadas duas medidas de centralidade do BELG: os graus dos vértices e autovetor.

A análise do grau da rede, ou seja, o número de ligações conectadas a uma determinada unidade (CANTWELL & FORMAN, 1993), foi realizada com algoritmo nativo do Gephi.

Para o cálculo da centralidade de autovetor (*Eigenvector Centrality*) foi utilizado algoritmo nativo do Gephi, com os parâmetros de 100 iterações e rede não dirigida. A centralidade de autovetor define a influência de um vértice de acordo com a importância dos vértices com os quais está conectado (BONACICH, 1972). Ao contrário do grau, que pondera todos os contatos igualmente, o autovetor pondera os contatos de acordo com suas centralidades. Assim, a alta pontuação de um vértice é mais influenciada por conexões com outros com pontuação alta do que com os de pontuação baixa. A centralidade é calculada a partir de um valor proporcional à soma das centralidades dos vértices adjacentes, ponderada pelo peso das arestas relativas a esses vértices (RAHMATALLAH *et al.*, 2014). Neste trabalho, o peso das arestas é dado pelo valor dos fluxos de bioenergia entre as BELUs.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados e as discussões das análises realizadas nessa pesquisa, relativas à produção e fluxo de bioenergia na paisagem nos cenários atual e alternativos.

Nos itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresenta-se as variáveis ambientais que condicionam a produção de bioenergia do sistema; no item 4.5, as Unidades Bioenergéticas da Paisagem; e no item 4.6 a caracterização dos cenários alternativos. No item 4.7 apresentam-se a dinâmica bioenergética (evolução da bioenergia e seus fluxos) da paisagem como um todo, das unidades territoriais, das Unidades de Conservação e áreas verdes urbanas. A análise da estrutura da rede (ou grafo) e as relações com a sua dinâmica bioenergética é apresentada no item 4.8.

4.1 USO E COBERTURA DO SOLO

O mapa de uso e cobertura do solo (Figura 12) elaborado após as adequações relatadas na seção 3.2 ELABORAÇÃO DE MAPAS BASE, utiliza o padrão de cores do CORINE Land Cover (CLC) e retrata as classes e percentuais de cobertura detalhadas na Tabela 10. Esses dados foram utilizados para o cálculo do $K_{ecotopo}$ e do $K_{vegetação}$, conforme descrito no item 3.5. A distribuição relacionada ao BTC da vegetação é representada na Figura 13.

Tabela 10 – Quantitativo das classes de uso e cobertura do solo do município de Juiz de Fora

Classe	Área (ha)	%
Pastagem	66.794,62	46,51
Formação Florestal	38.339,93	26,70
Mosaico de Agricultura e Pastagem	23.267,16	16,20
Infraestrutura Urbana - Ocupação Densa	6.571,93	4,58
Floresta Plantada	4.119,93	2,87
Infraestrutura Urbana - Ocupação Dispersa	2.150,57	1,50
Unidade Industrial ou Comercial e Instalação Pública	1.452,64	1,01
Lago	488,22	0,34
Mineração	196,81	0,14
Afloramento Rochoso	156,88	0,11
Rio	61,40	0,04
Formação Savânica	12,06	0,01
Total Geral	143.612,16	100,00

Fonte: Elaborado pela autora.

As pastagens recobrem 46,51% (66.794,62 ha) do território do município refletindo o padrão histórico de desmatamento para ocupação do território pela

pecuária e cafeicultura (LESSA, 1985; BASTOS *et al.*, 1987; MACHADO, 1998; DRUMMOND *et al.*, 2005). O quantitativo de Formação Florestal identificado na totalidade do município é de 38.339,93 ha (26,70% do território) e representa 663,86 m² por habitante. A infraestrutura urbana ocupa cerca de 6% do território, com 8.722,50 ha, sendo que desses, 6.571 ha constituem o centro urbano municipal.

As áreas de silvicultura (Floresta Plantada) ocupam predominantemente a região noroeste do município, representando 2,87% da área municipal (4.119,93 ha).

Dados de transição de uso e cobertura do solo no período entre 1985 e 2020 (Tabela 11) relatam o aumento de 33,09% das áreas de Formação Florestal (de 31.611ha para 42.073ha) e 71,43% das áreas de Afloramento Rochoso (de 7,32ha para 11,65). Ressalta-se que essa classe pode incluir tanto rocha natural como solo exposto por desmatamento ou queimada. Por outro lado, verifica-se o aumento de Áreas Não Vegetadas (classe 4 em nível de classificação 1) de 5.397ha para 9.256ha (aumento de 71,50%), refletindo principalmente a expansão de áreas urbanizadas (de 5.128,12ha para 8.955,50ha). A área ocupada por água variou de 740,78ha para 687,46ha, com diminuição de 7,20%. Tal variação pode dever-se ao efeito da sazonalidade (épocas de maior cheia ou estiagem) não capturada nos dados de referência (PROJETO MAPBIOMAS, 2022b) ou mesmo à perda de superfície natural de água pela ação humana ou diminuição de água nos reservatórios causada pela estiagem.

O aplicativo “Aqui tem Mata?” (<https://www.aquitemmata.org.br/>), com dados elaborados através de parceria entre a Fundação SOS Mata Atlântica (2022) e o INPE, relata que 16.032,99 ha dessa cobertura é composta por áreas com ao menos 3 hectares de área contínua bem preservada, que representa 11,17% da Mata Atlântica original do município. Para área com uso agropecuário (classe 3 em nível de classificação 1) verifica-se a diminuição de 15,59% (de 105.819ha para 91.546ha) no mesmo período.

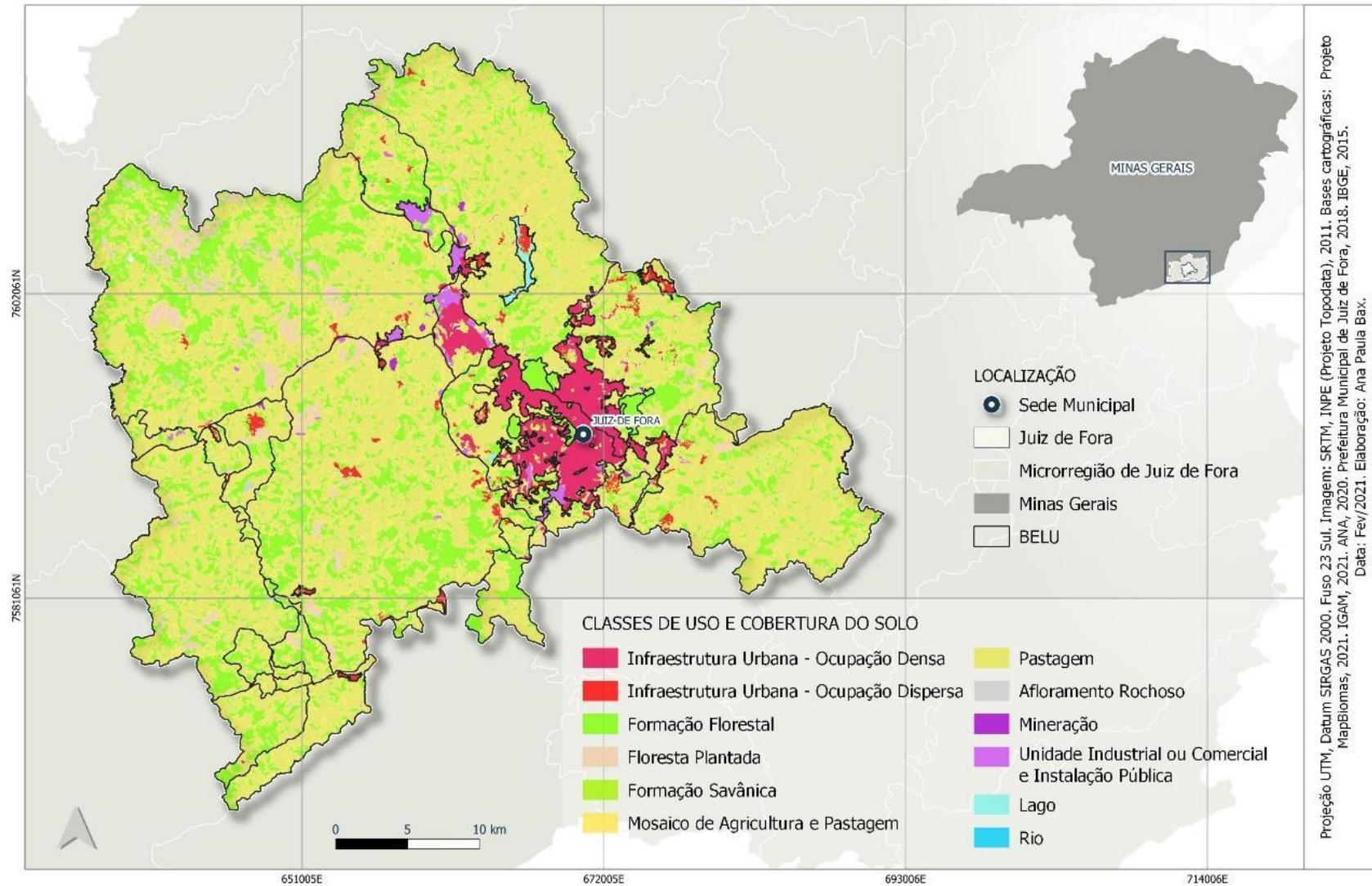


Figura 12 – Mapa de uso e cobertura do solo do município de Juiz de Fora Fonte: Elaborado pela autora adaptado de MapBiomas (2021b).

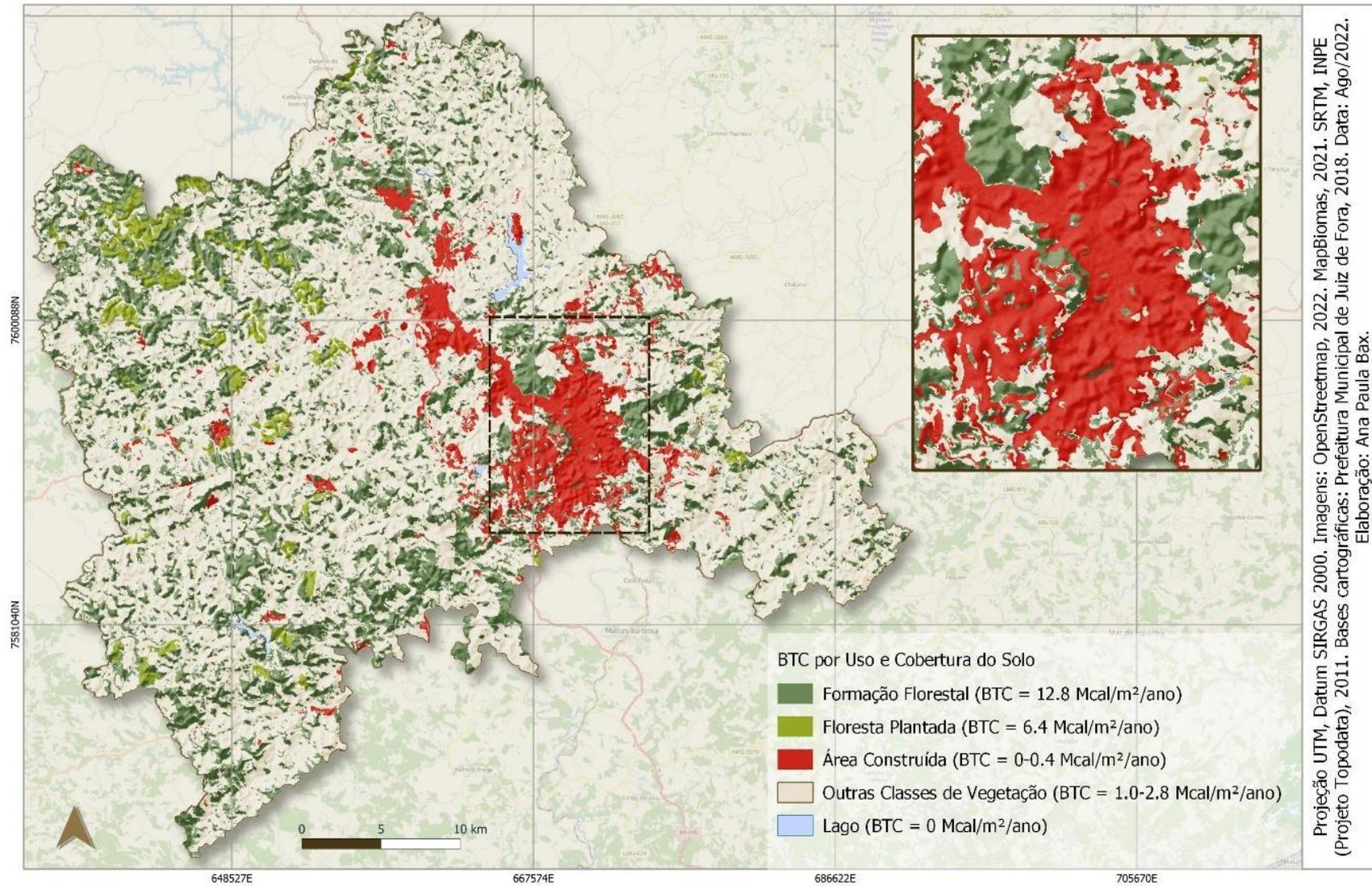


Figura 13 – Mapa de Capacidade Biológica Territorial (BTC) por classe de uso e cobertura do solo. Fonte: Elaborado pela autora.

Na área urbana definida pelo Plano Diretor municipal (JUIZ DE FORA, 2018a), os remanescentes florestais representam o total de 9.172,22 ha e 158,81 m² por habitante.

Tabela 11 – Detalhamento dos dados de transição do uso e cobertura do solo de Juiz de Fora, no período de 1985 a 2020 (valores em hectares)

	2020											Total (1985)
	1.1	2.4	3.1	3.2.2	3.3	3.4	4.2	4.3	4.4	5.1		
1985												
1.1 Formação Florestal	26.226,18	0,83	2.300,55	43,83	77,73	2.808,63	113,05	2,08	12,22	25,45		31.610,54
2.4 Afloramento Rochoso		6,49	0,58			0,25						7,32
3.1 Pastagem	7.474,80	0,67	53.521,89	59,62	158,76	12.631,26	2.822,47	1,33	149,51	119,05		76.939,37
3.2.2 Lavoura Perene	126,93		22,87	5,07	0,33	10,73						165,94
3.3 Silvicultura	3,99		3,74			0,83						8,57
3.4 Mosaico de Agricult. e Pastagem	8.141,08	3,66	10.200,84	22,52	43,26	9.306,67	831,13	4,74	70,30	80,61		28.704,82
4.2 Área Urbanizada	1,16		0,17			0,75	5.124,29			1,75		5.128,12
4.3 Mineração						0,17		1,41				1,58
4.4 Outra Área Não Vegetada	14,81		56,08			83,54	51,42	0,33	57,16	3,91		267,26
5.1 Rio e Lago	84,16		10,07			174,97	13,14	1,17	0,58	456,69		740,78
Total (2020)	42.073,11	11,65	66.116,79	131,05	280,08	25.017,81	8.955,50	11,07	289,78	687,46		143.574,29

Fonte: Projeto MapBiomias (2021b).

A transição de uso e cobertura do solo de Juiz de Fora no período de 1985 a 2020 para o segundo nível categórico está representada no Diagrama Sankey (Figura 14).

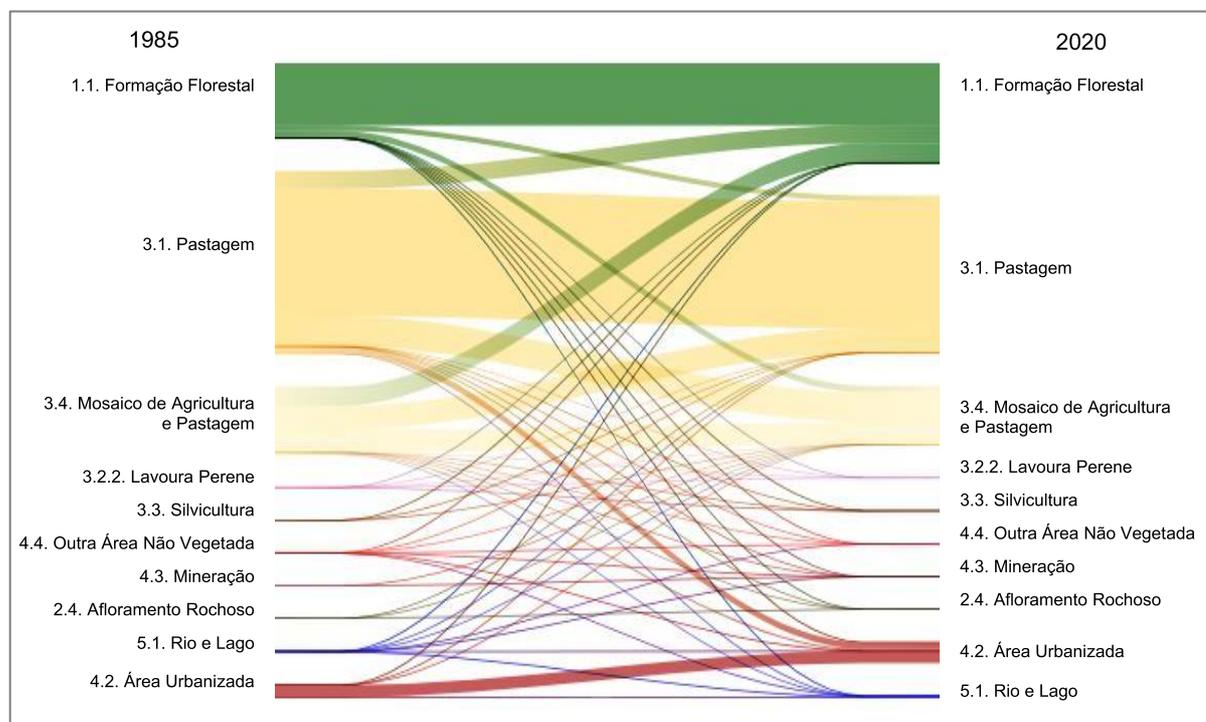
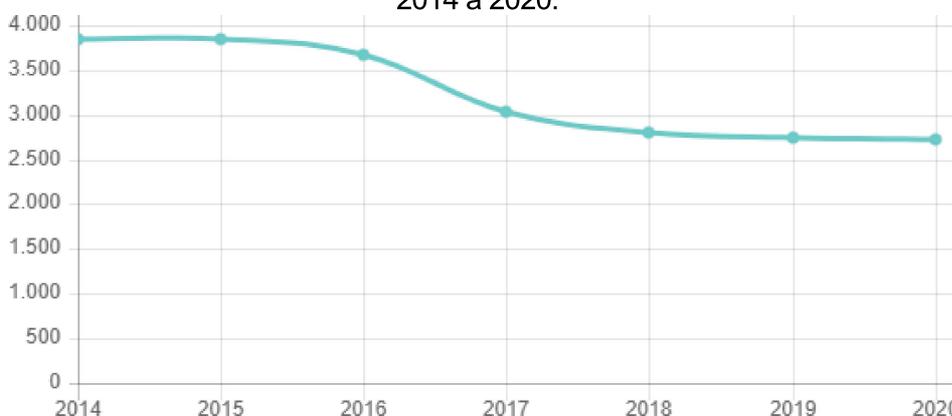


Figura 14 – Diagrama Sankey da transição de uso e cobertura do solo de Juiz de Fora no período de 1985 a 2020. Fonte: Projeto MapBiomias (2021b).

Observa-se que em 2020 a extensão total da área de silvicultura era de 280,08ha, o que representou um aumento de mais de 3000% em relação ao ano de 1985, quando a área total era de 8,57ha. No entanto, dados do IBGE (2021) indicam que em 2014 a área de cobertura pela silvicultura de eucalipto era de 3.850ha e, em 2020, de 2.720ha (Gráfico 2).

Devido à importância da vegetação arbórea representada pela silvicultura de eucalipto em termos de produção de bioenergia, neste trabalho foi realizada inspeção visual para sua diferenciação da mata nativa. Utilizou-se imagens Landsat-8 e superior disponíveis nas plataformas Google Earth e Bing, para reclassificação das tipologias por meio do *plug-in* QuickMapServices (2019) no software QGIS (2021). Após a reclassificação, verificou-se que, de fato, havia mais áreas de silvicultura do que indicavam os dados do MapBiomas, em acordo com o reportado pelo IBGE (2021b e c) e com o mapeamento constante do Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora (JUIZ DE FORA, 2018b).

Gráfico 2 – Série História de Silvicultura de eucalipto no município de Juiz de Fora, no período de 2014 a 2020.



Fonte: IBGE (2021b).

4.2 TIPOS DE SOLO

O mapa de solo (Figura 15), elaborado a partir de informações do Mapa de Solos de Minas Gerais (UFV *et al.*, 2010), indica a predominância do Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, ocupando cerca de 77% do território. O Latossolo Amarelo Distrófico está presente em aproximadamente 20% da área total do município. Ocorrem ainda pequenas porções de Cambissolo Háplico Tb Distrófico e Cambissolo Húmico Distrófico. (UFV *et al.*, 2010).

O K_{solo} obtido para o território é apresentado na Tabela 12, onde verifica-se que 75,86% do município tem o índice na faixa de 0,9, indicando relativo bom nível de fertilidade, dentro do que é possível para os tipos de solo de ocorrência na área, de acordo com a categorização estabelecida na Tabela 6.

Tabela 12 – K_{solo} do município de Juiz de Fora

BELU	K_{solo}	Área (ha)	% do território
1, 11, 12, 14, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 46, 55, 58, 59, 60, 61, 64, 65, 69, 71	0,80 a 0,89	20.135,31	14,02
8, 13, 17, 18, 21, 22, 33, 45, 52, 53, 66, 70, 72, 74	0,90 a 0,99	108.960,54	75,86
2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 35, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 56, 57, 62, 63, 67, 68, 73	1,00	14.538,37	10,12

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 EROSÃO

O mapa de erosão de Juiz de Fora (Figura 16) foi elaborado a partir dos dados do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (SCOLFORO *et al.*, 2008) e indica que os maiores índices de erosão são encontrados nas Regiões de Planejamento municipais, definidas no Plano Diretor (JUIZ DE FORA, 2018a), que constituem o Distrito Sede municipal. Tais áreas apresentam a maior parte dos núcleos urbanos do município, sendo que algumas regiões sofrem grande pressão de expansão urbana.

O $K_{\text{erosão}}$ obtido para o município é apresentado na Tabela 13 – $K_{\text{erosão}}$ das BELUs do município de Juiz de Fora, onde é possível verificar que aproximadamente 30% do território apresenta o índice variando na faixa de 0,25 a 0,49, o que indica erodibilidade como muito alta e alta, de acordo com a ponderação estabelecida na Tabela 7.

Note-se que 9 dos 11 espaços naturais protegidos presentes no município localizam-se em áreas de erosão alta ou muito alta (Tabela 13). Essa condição afeta igualmente os fragmentos de mata inseridos na área urbana e periurbana e que podem constituir *stepping stones* para a dispersão vegetal e animal, contribuindo negativamente para a manutenção e sustentabilidade desses fragmentos e, logo, do ambiente como um todo.

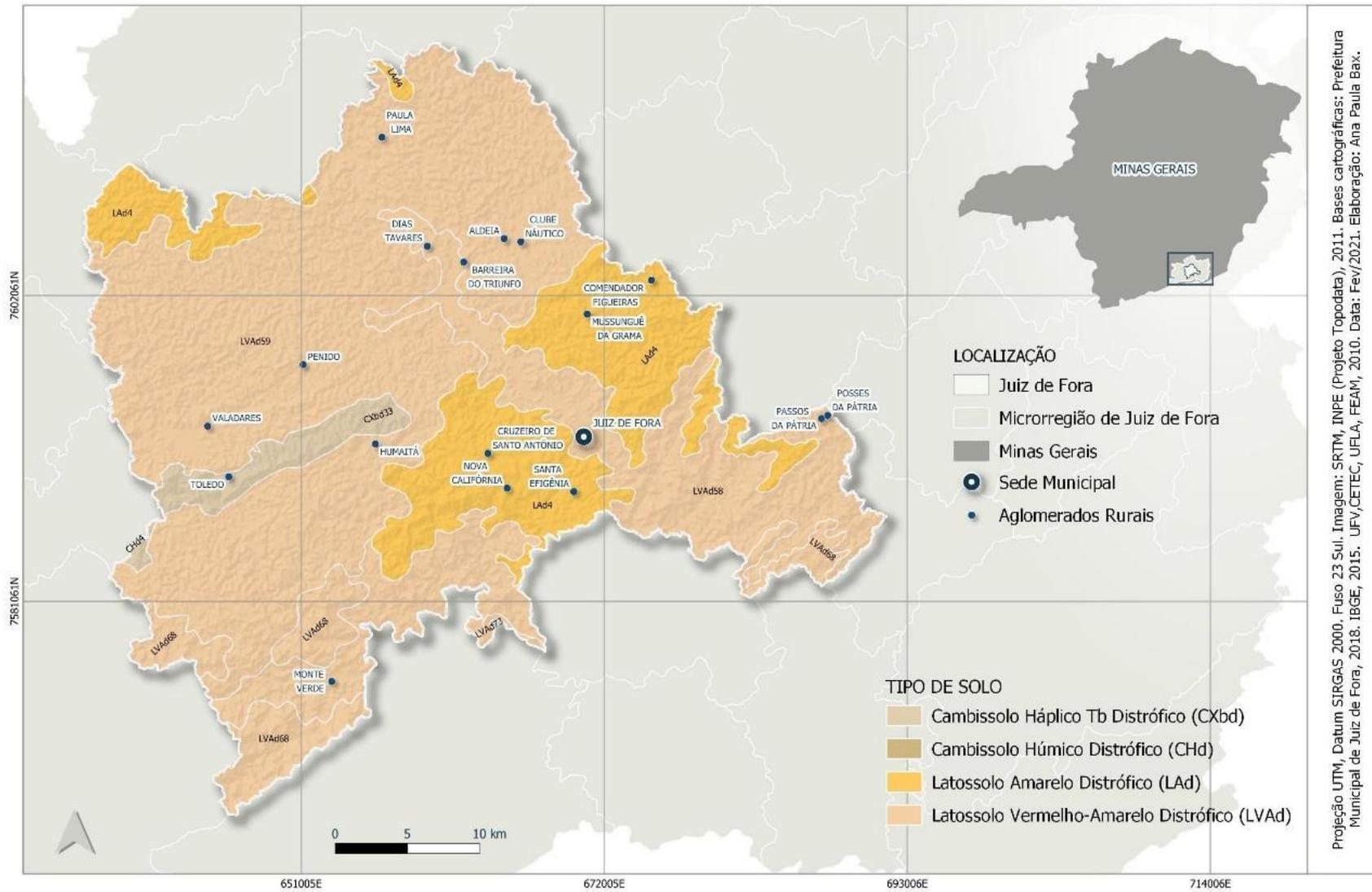


Figura 15 – Mapa de solo do município de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

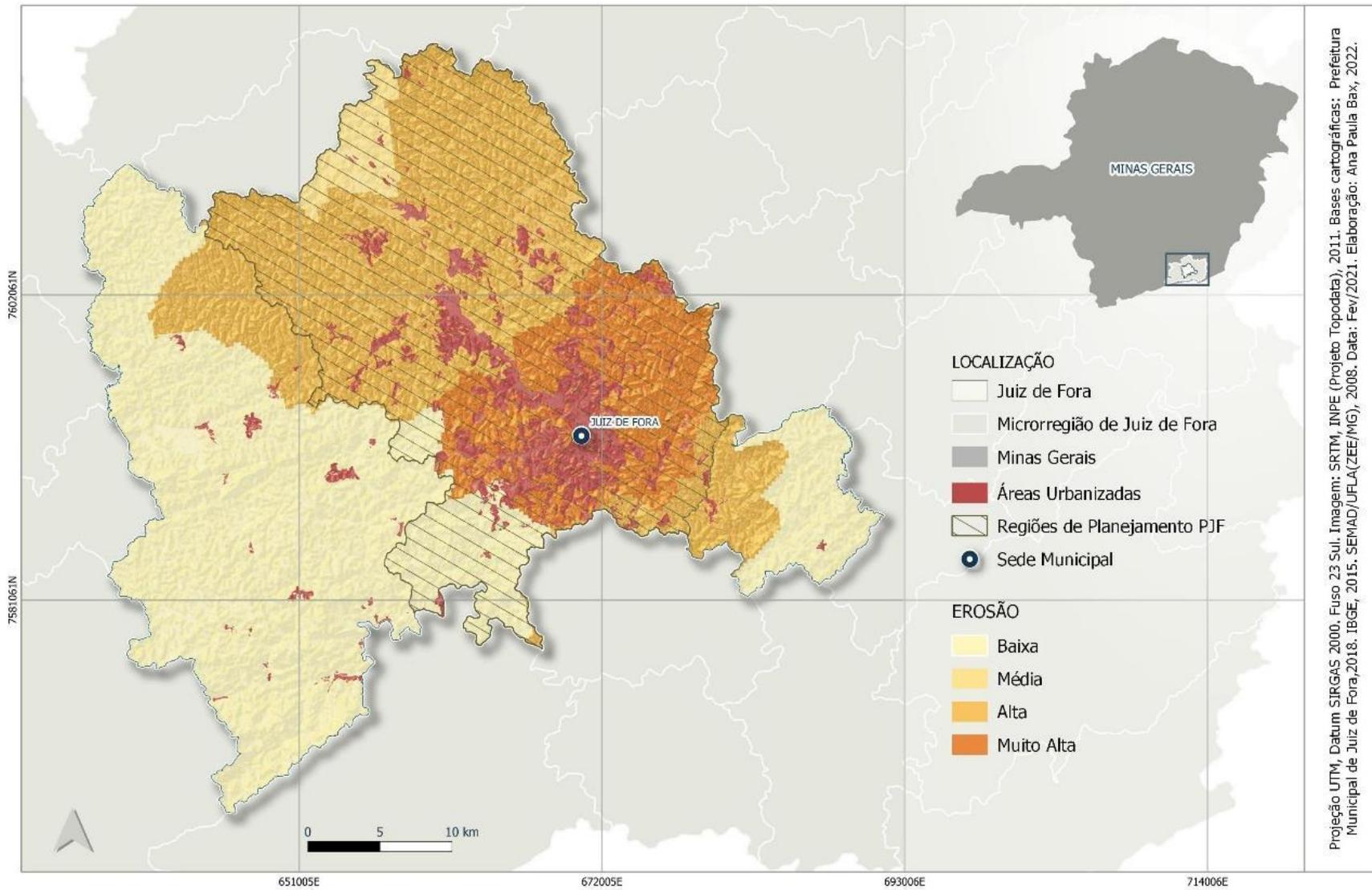


Figura 16 – Mapa de erosão do município de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 13 – $K_{\text{erosão}}$ das BELUs do município de Juiz de Fora. As BELUs em negrito e sublinhadas indicam espaços naturais protegidos.

BELU	$K_{\text{erosão}}$	Área (ha)	% do território
1,2, 3 , 6, 10 , 11 , 12, 13,14, 15 , 16 , 17, 19 , 20, 21, 22, 23 , 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34 , 35 , 36, 37, 38, 39, 40, 55, 58, 59, 60, 61,62, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73 74	0,25 a 0,59	43.536,80	30,31
4, 18, 33, 66	0,60 a 0,89	76.016,06	51,85
5, 7, 8, 9, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 , 51, 52, 53 , 54, 56, 57	0,9 a 1,00	25.623,43	17,84

Fonte: Elaborado pela autora.

As BELUs 4, 18, 33, 66 têm parte de seus territórios afetada por níveis de erosão considerados altos, mas como apresentam maior área e parte dessa superfície localizada em áreas de erosão baixa, no cálculo ponderado apresentam $K_{\text{erosão}}$ mediano.

Destaca-se, ainda, que as áreas dos mananciais hídricos municipais (Dr. João Penido, Ribeirão Estiva, Ribeirão Espírito Santo) e do Eixo do Rio Paraibuna apresentam erosão classificada como alta, o que pode comprometer a qualidade das suas águas e sua capacidade de abastecimento hídrico devido aos níveis de particulados nas águas e ao assoreamento dos leitos dos corpos d'água das bacias.

4.4 DISTRIBUIÇÃO DE UMIDADE

O mapa de distribuição da umidade foi apresentado na Figura 5, com a classificação climática desenvolvida por Nimer (1979) e adotada pelo IBGE (2002).

O K_{umidade} obtido para território é apresentado na Tabela 14, onde é possível verificar que 77,89% do território apresenta o índice variando na faixa de 0,30 a 0,49, o que indica influência de clima com média umidade para os padrões da região, de acordo com a ponderação estabelecida na Tabela 8.

Tabela 14 – K_{umidade} das BELUs do município de Juiz de Fora. As BELUs em negrito e sublinhadas indicam espaços naturais protegidos.

BELU	K_{umidade}	Área (ha)	% do território
2, 4, 8, <u>10</u> , <u>11</u> , 12, 13, 14, <u>15</u> , <u>16</u> , 17, 18, 20, 21, 22, <u>23</u> , 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, <u>34</u> , <u>35</u> , 36, 37, 38, 39, 40, <u>53</u> , 55, 63, 64, 65, 68, 71, 74,	0,20 a 0,29	30.723,9609	21,39
3, 5, 6, 7, 9, 33, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, <u>50</u> , 51, 52, 54, 56, 57, 62, 66, 69, 70, <u>72</u> , 73	0,30 a 0,49	111.882,0405	77,89
1, <u>19</u> , 58, 59, 60, 61, 67	0,50	1.028,2174	0,72

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a composição da condicionante climática, Gobattoni *et al.* (2014) propõem também a utilização de índice relativo à variação de insolação incidente para cada estação do ano. Tal medida não foi adotada neste trabalho. A interpolação dos dados constantes do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017) disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicou que a incidência de irradiação solar é relativamente homogênea (quando comparada às variações das regiões temperadas, onde há, inclusive, períodos de ocorrência de neve devido à baixa incidência solar) durante o ano para a região de estudo, especialmente por tratar-se de escala municipal.

4.5 UNIDADES BIOENERGÉTICAS DA PAISAGEM

O mapa das barreiras naturais e artificiais ao fluxo de bioenergia presentes no território utilizadas para a definição das BELUs é apresentado na Figura 17. As barreiras são categorizadas em infraestrutura urbana, rodovias, rios e vegetação de áreas verdes e espaços naturais protegidos, de acordo com a Tabela 9, que demonstra também a permeabilidade de cada categoria de barreira.

A partir da definição das barreiras, o território foi individualizado em 74 BELUs. Cada Unidade foi identificada por um número e nomeada de acordo sua localização ou denominação do espaço natural protegido e calculada sua área e perímetro (vide Anexo D para mais detalhes).

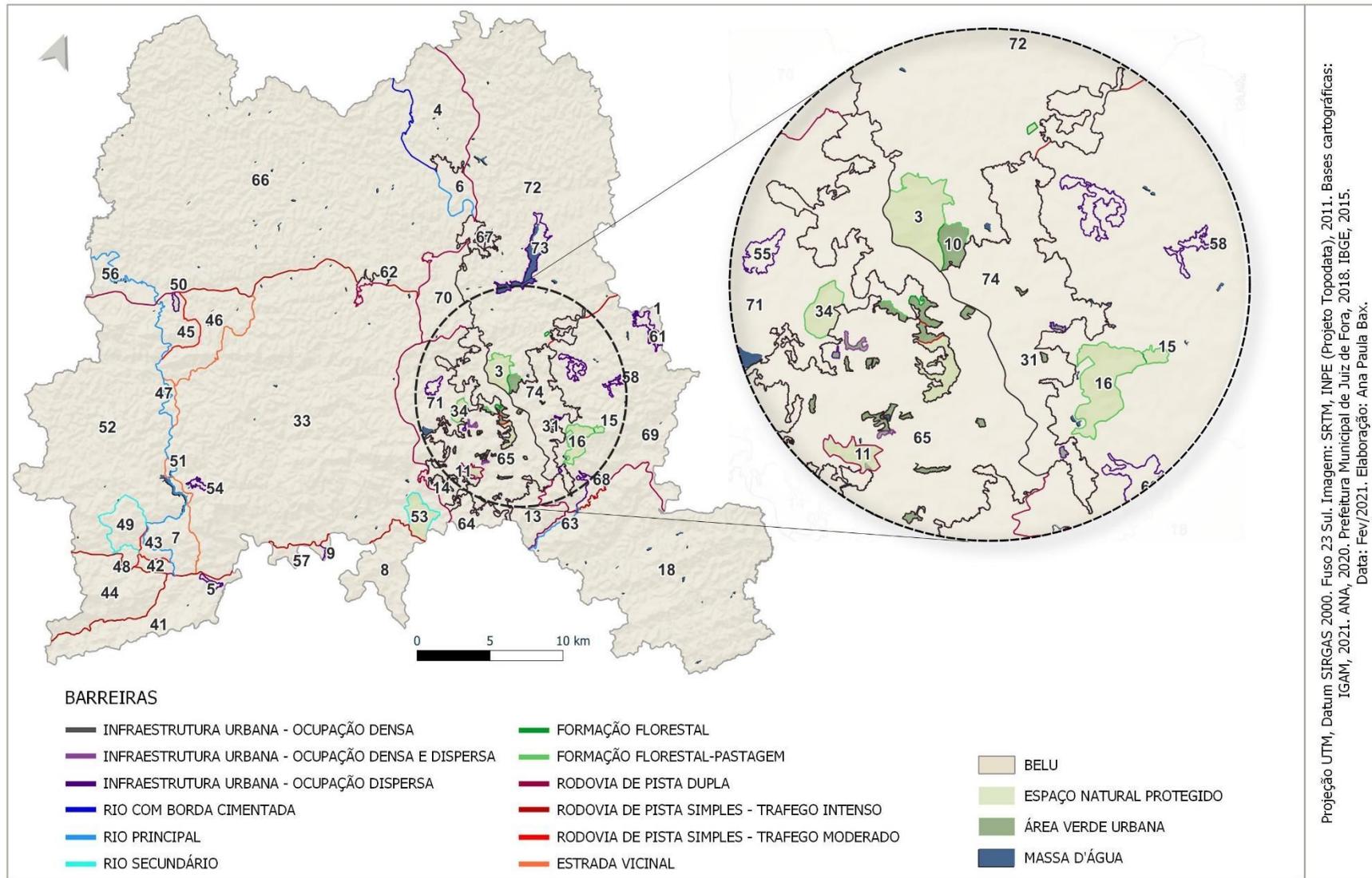


Figura 17 – Mapa de BELUs e barreiras ao fluxo de bioenergia no município de Juiz de Fora. Fonte: Elaborado pela autora.

As BELUs com maiores extensões territoriais estão localizadas na área rural ou em áreas periurbanas do município. Apenas a BELU 65, constituída pelo centro urbano municipal não tem tais características (Tabela 15). Trata-se de infraestrutura compacta. A área foi dividida em 2 BELUs em função da presença de uma via rodoviária pavimentada de alto tráfego que percorre a área, acompanhando o trajeto do Rio Paraibuna. As Unidades com menor extensão localizam-se, predominantemente, inseridas ou periféricas à área urbana.

Tabela 15 – BELUs com maiores áreas territoriais

BELU	Área (ha)
66	31.365,6247
33	26.786,8653
72	18.817,8970
18	13.163,4756
52	11.619,8840
69	8.203,7395
65	4.531,7997

Fonte: Elaborado pela autora.

Além da individualização das 10 UCs legalmente estabelecidas e 2 espaços naturais protegidos não categorizados pelo SNUC, foram individualizadas 21 áreas verdes urbanas com mais de 3 ha (vide Anexo D).

4.6 CENÁRIOS ALTERNATIVOS: DEMARCAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS APPS

A Figura 18 demonstra a demarcação das áreas de mananciais da Represa Dr. João Penido, do Ribeirão Espírito Santo e da bacia do Ribeirão Estiva e do Eixo do Rio Paraibuna. Na mesma Figura também estão representadas a cobertura florestal das APPs nos cenários atual e alternativos: (a) atual; (b) CA 1, com supressão de todos os tipos vegetacionais e substituição por pastagem em 100% das APPs; (c) CA2, com cobertura florestal em 30% da área total das APPs; e (d) CA3, com cobertura florestal em 70% da área total das APPs.

A Figura 19 demonstra as BELUs que interseccionam com áreas dos mananciais e do Eixo do Rio Paraibuna e suas respectivas APPs. Verifica-se que as áreas de mananciais do município estão inseridas quase em sua totalidade nas BELUs 66 e 72.

A Tabela 16 detalha os dados das APPs de mananciais hídricos. A área total das APPs corresponde a pouco mais que 2% da área total das BELUs e a 1,25% da área total

do município. De maneira semelhante, quando se considera o CA 2, 30% do total das APP com cobertura florestal representam 0,37% da área total do município. No CA3, 70% do total das APPs florestadas, representam 0,87% da área total municipal. Ou seja, em eventual decisão dos gestores municipais de realizar a restauração ou preservação das APPs de mananciais, o quantitativo em relação à área total do município é irrelevante. Isso não ocorre no caso de sua importância para a produção de bioenergia e conectividade do município, como será discutido adiante.

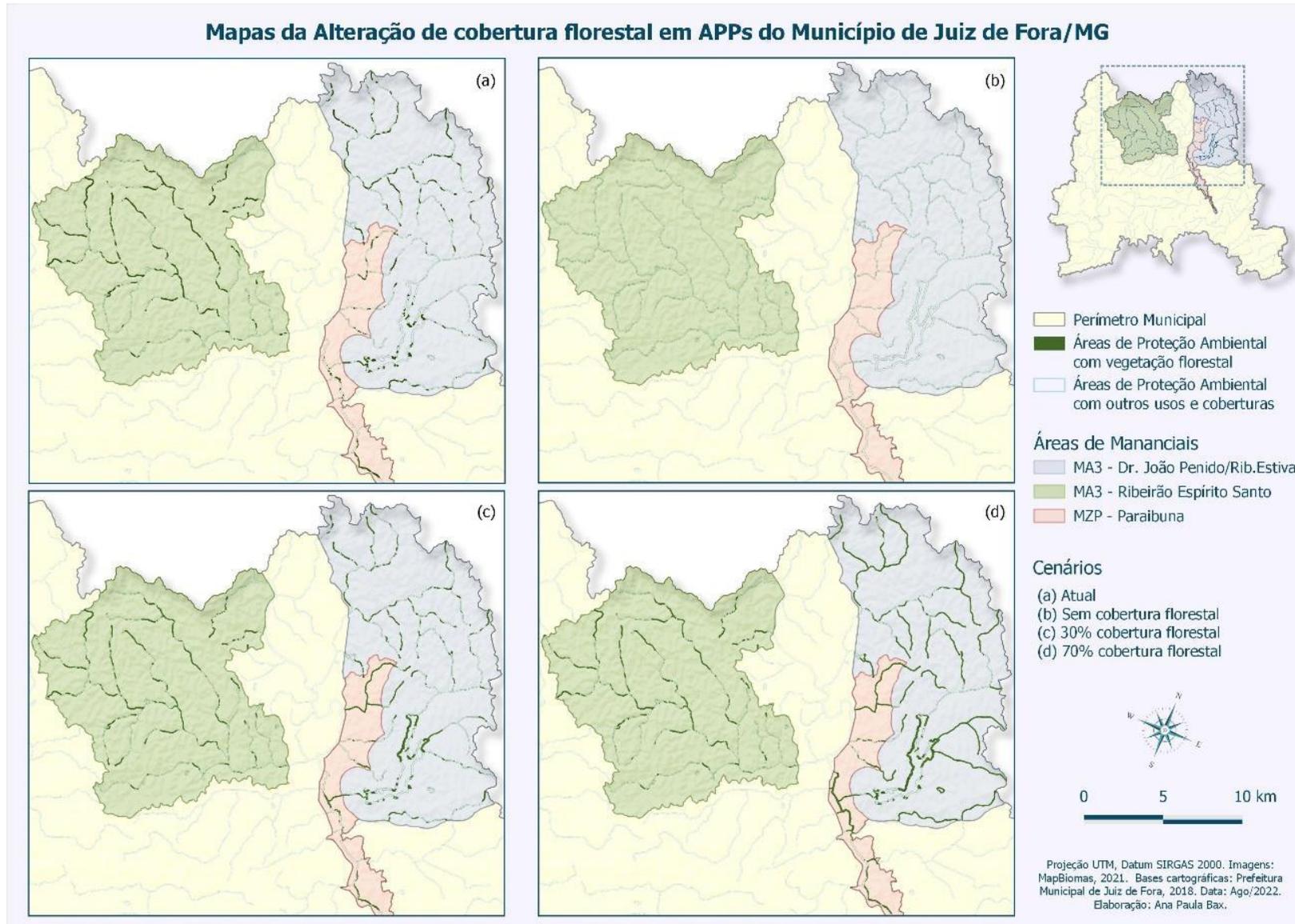


Figura 18 – Mapa da cobertura florestal em APPs nos cenários atual e alternativos. Fonte: Elaborado pela autora.

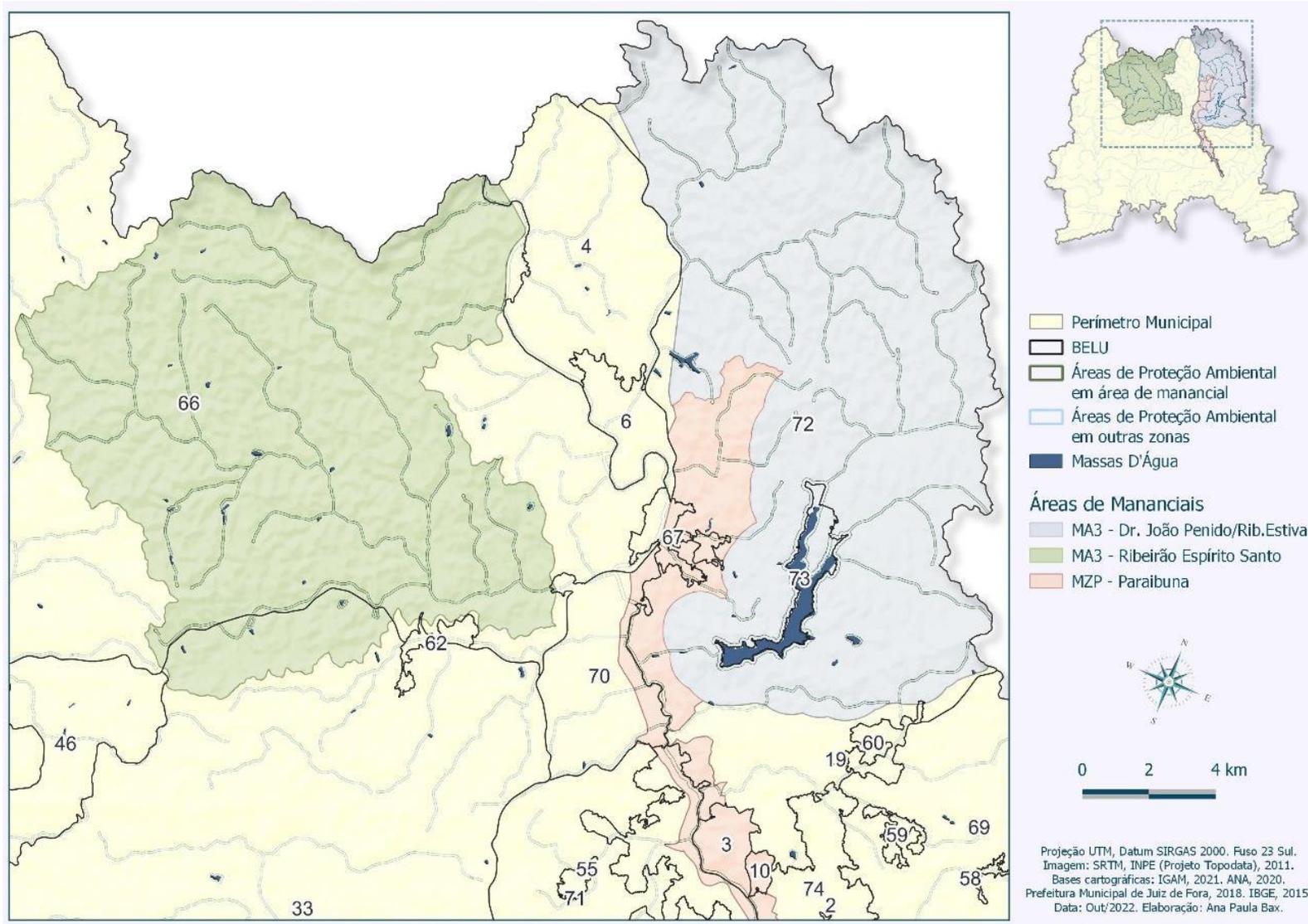


Figura 19 – Interseção das áreas de APPs nas BELUs. Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16 – APPs em áreas de mananciais e Eixo do Rio Paraibuna em cada BELU

BELU	Área Total da BELU (m ²)	Total Área de APP/BELU (m ²)	% Área APP/ BELU	CA2 - 30% Área APP (m ²)	CA3 - 70% Área APP (m ²)
3	3.317.709,76	218.233,89	6,578	65.470,17	152.763,72
4	31.580.276,45	97.337,04	0,308	29.201,11	68.135,93
10	827.593,03	38,48	0,005	11,54	26,94
33	267.868.652,91	194.541,77	0,073	58.362,53	136.179,24
35	93.396,36	17.949,00	19,218	5.384,70	12.564,30
65	45.317.989,63	636.923,76	1,405	191.077,13	445.846,63
66	313.656.246,51	6.398.588,24	2,040	1.919.576,47	4.479.011,77
67	3.296.472,65	215.235,40	6,529	64.570,62	150.664,78
70	16.708.473,50	271.313,04	1,624	81.393,91	189.919,13
72	188.178.472,43	9.096.662,93	4,834	2.728.998,88	6.367.664,05
73	4.320.111,33	407.293,21	9,428	122.187,96	285.105,25
74	17.257.058,67	356.281,00	2,065	106.884,30	249.396,70
Total	892.422.453,22	17.910.397,76	2,007	5.373.119,33	12.537.278,44
% Área/ Município	62,13%	1,25%	-	0,37%	0,87%
Área Total Municipal (m²)	1.436.342.174,34				

Fonte: Elaborado pela autora.

O incremento de vegetação simulado para os CA2 e CA3 ocorreu predominantemente na BELU 72, uma vez que, apesar de reconhecidamente importante para o abastecimento público da população pelo Plano Diretor municipal, apresenta maior índice de Áreas de Preservação Permanente com vegetação florestal suprimida, conforme demonstrado na Figura 18. Como se constitui zona rural, foi possível localizar áreas para a simulação da restauração do perfil florestal. Por outro lado, o Eixo do Rio Paraibuna apresenta grande parte de suas margens já impermeabilizadas pela ocupação urbana, uma vez que consiste historicamente em eixo de desenvolvimento e interligação municipal. Sendo assim, a Unidade apresenta poucas áreas disponíveis para restauração ou preservação. A BELU 66, por sua vez, ainda mantém boa parte das APPs preservadas. Identificou-se algumas áreas coincidentes com aquelas em que ocorre a silvicultura, em que foi possível simular a restauração.

4.7 DINÂMICA BIOENERGÉTICA DA PAISAGEM NOS CENÁRIOS ATUAL E ALTERNATIVOS

4.7.1 Dinâmica Bioenergética em nível dos biótopos para os cenários atual e alternativos

A bioenergia de cada biótopo e das BELUs para os cenários atual e alternativos é apresentada na Figura 20. Os destaques na figura mostram áreas em que houve maior variação da Bioenergia Assintótica, ainda que alterações tenham ocorrido em todo o sistema. Explicita-se, assim, que mesmo pequenas alterações (supressão ou restauração) na cobertura florestal em áreas concentradas, como no caso em estudo (BELUs 66 e 72), em que foram simuladas modificações em 0,37% e 0,87% da área do município (Tabela 16), têm potencial de afetar a conectividade e a vitalidade de todo o sistema, mesmo no nível dos biótopos.

No modelo PANDORA, cada patch (ou fragmento de uso e cobertura do solo) contribui para a definição do nível de bioenergia da Unidade da qual faz parte e na caracterização de seu papel no BELC global. A Figura 20 demonstra a bioenergia do sistema em nível dos biótopos. As áreas que apresentam os maiores valores de bioenergia são as mais importantes para a conectividade e conservação do sistema. É recomendada criteriosa avaliação ambiental para os casos de alteração de uso ou cobertura do solo, especialmente para as áreas próximas ou inseridas no centro urbano, uma vez que fornecem serviços ecossistêmicos de forma mais imediata à população dessas áreas e têm maiores restrições à conectividade impostas pela infraestrutura urbana linear e compacta.

As áreas com baixos valores de Bioenergia Assintótica podem ser consideradas para programas de restauração ou implantação de microflorestas (AGA KHAN FOUNDATION, 2022) com o objetivo de fortalecer a conectividade em seu entorno e ampliar sua contribuição para a conectividade geral do sistema.

4.7.2 Caracterização do BELG para os cenários atual e alternativos

A Figura 21 mostra o BELG para o cenário atual. Os círculos representam a Bioenergia de Equilíbrio de cada BELU e os vértices ligando os círculos retratam os fluxos de bioenergia entre BELUs adjacentes, condicionados pela energia a ser dissipada e pelo tamanho e permeabilidade das barreiras entre as Unidades.

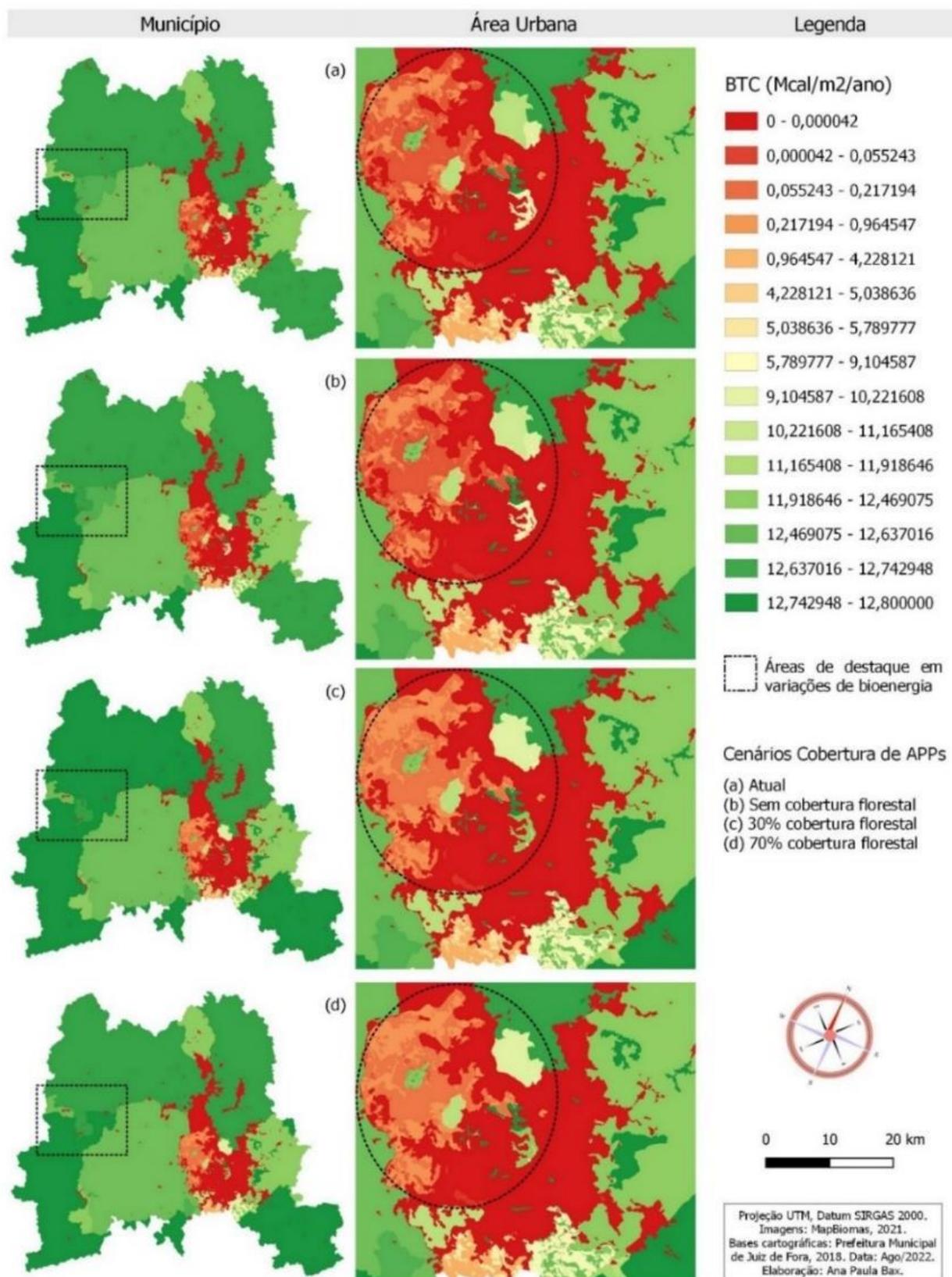


Figura 20 – Mapas de Bioenergia Assintótica em nível de biótopos: (a) cenário atual, (b) CA1, (c) CA2, (d) CA3. Os destaques (tracejado) indicam as áreas com maior variação entre os cenários. Fonte: Elaborado pela autora.

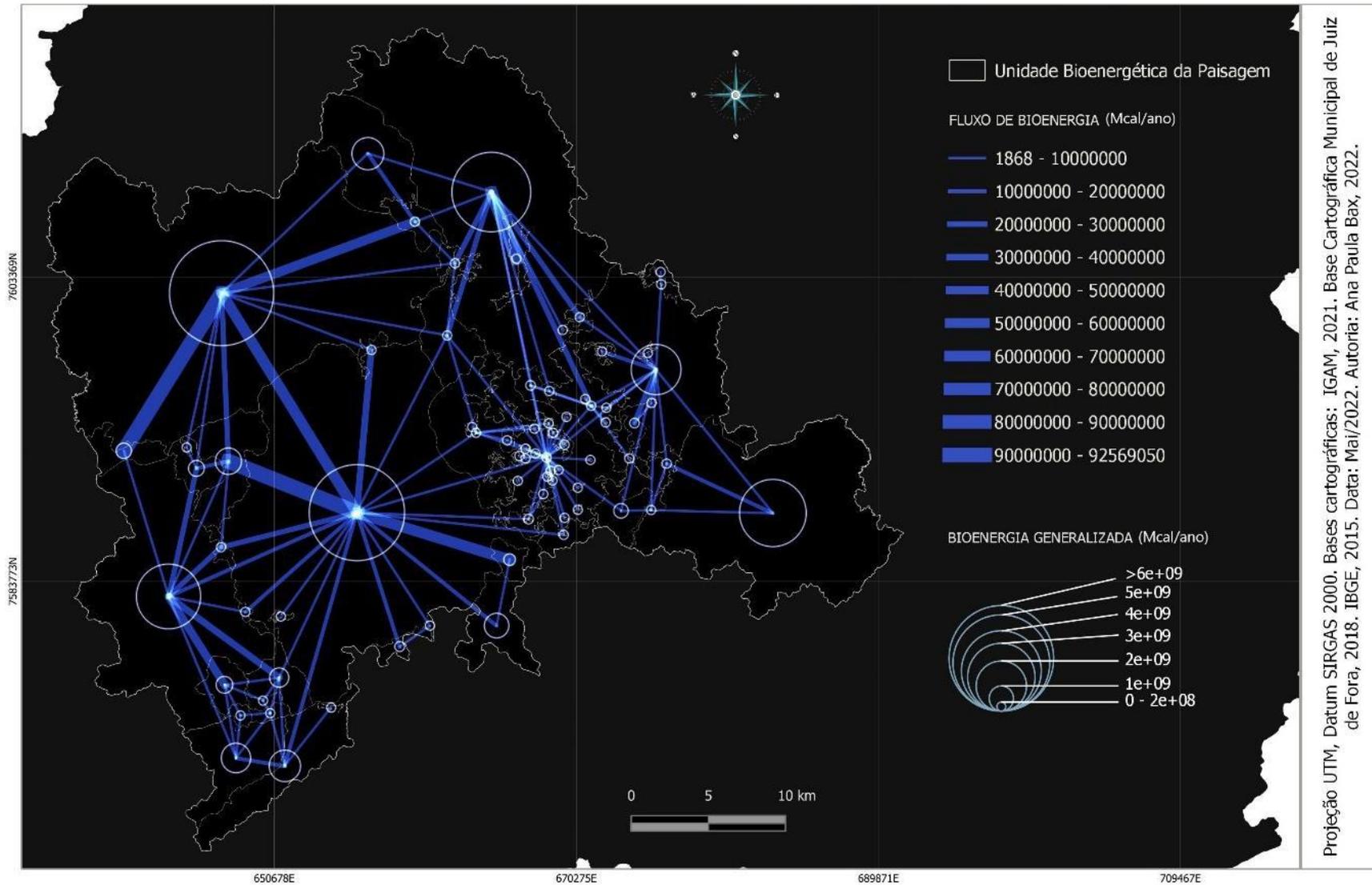


Figura 21 – Gráfico da Bioenergia da Paisagem (BELG) para o cenário atual. Os círculos representam a Bioenergia de Equilíbrio de cada BELU e os vértices ligando os círculos retratam os fluxos de bioenergia entre BELUs adjacentes. Fonte: Elaborado pela autora.

A produção total de bioenergia no território foi de 10,62 bilhões de Mcal/ano. As Unidades Territoriais (66, 33 e 72) localizadas nas áreas rurais do município apresentam o maior nível de bioenergia (aproximadamente entre 1,0 e 3,0 bilhões de Mcal/ano). As BELUs 4, 7, 8, 18, 41, 44, 46, 52 e 69, localizadas a oeste e leste do centro urbano, mas ainda na zona rural, apresentam bioenergia intermediária, na faixa entre 120,0 milhões e 920,0 milhões de Mcal/ano. A grande maioria das Unidades localizadas nas zonas urbanas e periurbanas apresentam valores de bioenergia mais baixos (<50 milhões de Mcal/ano), sendo que algumas (BELUs 6, 12, 25, 60, 62, 65, 67, 68, 70, 73, 74) chegam a apresentar Bioenergia de Equilíbrio com valores próximos ou iguais a zero, correspondendo às áreas urbanizadas e algumas áreas verdes urbanas, como a BELU 12 (Mata da Faculdade de Educação Física da UFJF) e a BELU 25 (Mata do bairro Cascatinha). Nota-se também que o Parque Natural Municipal da Lajinha (BELU 11) apresenta um dos menores níveis de Bioenergia de Equilíbrio (30,25 Mcal/ano), ainda que sua Bioenergia Inicial supere os 9,0 milhões de Mcal/ano. Esse resultado indica que sua sustentabilidade como espaço natural protegido está ameaçada a longo prazo, uma vez que a Unidade se encontra insulada por vias e áreas urbanizadas. É primordial, então, que se crie conexões com outras áreas verdes de modo a garantir seu papel na conservação ambiental da região. As Unidades apresentam cobertura florestal de 63,05% (BELU 12), 51,11% (BELU 25) e 50,48%(BELU 11) de suas áreas.

Destaca-se, também, que as BELUs 33, 46, 50, 53, 66 e 72, ainda que apresentem menos de 35% de sua área coberta por Formação Florestal, obtiveram os maiores índices de Bioenergia de Equilíbrio. Com expressivas extensões territoriais, o total da área coberto por Formação Florestal nessas Unidades é bem maior que as das demais BELUs e, como são localizadas na zona rural do município, são menos recortadas por barreiras internas e limítrofes de baixa permeabilidade. Dessa forma, propiciam padrões bioenergéticos bastante relevantes e com forte sustentabilidade.

Em geral, quanto mais próximo dos centros urbanos, menor a área das BELUs, em função da necessidade de implantação de infraestrutura urbana para atender às demandas da população. Assim, os fluxos de energia, materiais e biodiversidade nas áreas próximas às cidades geralmente é menor. (GOBATTONI *et al.*, 2011; PELOROSSO *et al.*, 2016; CHENG *et al.*, 2018; WANGUE *et al.*, 2019, ASSUMMA *et al.*, 2021).

Os resultados obtidos para a Bioenergia Assintótica e para os fluxos bioenergéticos sinalizam a importância da conectividade para a saúde, permanência e capacidade de fornecer Serviços Ecossistêmicos das BELUs, especialmente os espaços naturais protegidos. A implantação de florestas urbanas e aproveitamento de áreas abandonadas ou degradadas para a restauração da vegetação em locais estratégicos poderiam contribuir para a melhoria da conectividade ambiental, do clima e da qualidade do ar urbanos, propiciar oportunidades de atividades recreativas para a população, além de valorizar as áreas adjacentes (RINK & SCHMIDT, 2021).

A Tabela 17 apresenta a relação entre a área e a Bioenergia de Equilíbrio e a taxa de cobertura por Formação Florestal para as BELUs com maior bioenergia (66, 33 e 72), as Unidades de Conservação e as áreas verdes urbanas.

Tabela 17 – Relação entre área e Bioenergia de Equilíbrio das BELUs com maior Bioenergia Assintótica (66,33 e 72), Unidades de Conservação e as áreas verdes urbanas

BELU	Denominação	Área (m ²)	Formação Florestal (%)	M _{eq} (Mcal/ano)	M _{eq} /m ² /ano
66	Rosário de Minas	313.656.246,51	32,87	6.844.820.438,13	21,82
33	Humaitá	267.868.652,91	30,03	5.734.084.776,11	21,41
50	RPPN Fazenda Boa Vista	400.459,73	30,38	8.412.490,22	21,01
46	Mata do Ribeirão do Carmo	20.672.550,73	21,52	433.084.136,21	20,95
53	RPPN Salvaterra	4.104.615,86	28,22	85.757.936,83	20,89
72	Aldeia	188.178.472,43	20,90	3.922.844.805,08	20,85
19	RPPN Nova Gramado	53.250,32	93,04	1.067.978,90	20,06
15	RPPN Lavínica	267.314,57	93,78	5.225.633,33	19,55
16	Reserva Biológica Poço D'anta	2.914.884,85	98,04	56.986.255,24	19,55
22	Mata do Bosque Imperial	220.277,06	99,31	4.206.861,48	19,10
2	Mata do Progresso	32.089,62	100,00	611.966,86	19,07
40	Mata da Santa Casa	47.246,09	100,00	901.008,85	19,07
21	Mata do Vale Do Ipê	336.408,79	95,41	6.279.820,51	18,67
24	Mata do Dom Bosco	38.258,57	58,70	710.012,89	18,56
26	Mata da Reitoria UFJF	75.693,86	60,30	1.404.740,58	18,56
28	Mata do São Mateus	111.570,88	40,21	2.070.581,15	18,56
37	Mata do São Pedro	41.730,34	100,00	774.426,32	18,56
38	Mata da Cervejaria Barbante	41.281,59	100,00	766.102,43	18,56
39	Mata do Cidade Alta	71.472,08	100,00	1.326.381,65	18,56
32	Mata de Lourdes	50.018,92	96,67	925.985,27	18,51
20	Mata do Borboleta	186.022,11	88,26	3.438.251,29	18,48
3	Parque Estadual Mata do Krambeck	3.317.709,76	94,65	57.404.693,86	17,30
36	Mata do Cond. Jardim da Serra	134.028,72	74,14	2.194.468,50	16,37
17	Mata do Bom Jardim	52.495,76	98,42	841.274,51	16,03
34	Reserva Biológica Santa Cândida	1.162.768,99	88,06	17.959.951,34	15,45
29	Mata do Teixeiras	61.534,73	75,68	926.933,05	15,06
10	Jardim Botânico	827.593,03	82,12	11.633.013,28	14,06
31	Mata do Vitorino Braga	39.929,57	52,08	450.793,46	11,29
23	Reserva do Monumento Natural Morro do Cristo	1.038.366,95	90,41	7.268.865,32	7,00
27	Mata do Santa Luzia	111.925,77	60,18	322.519,67	2,88
35	Museu Mariano Procópio	93.396,36	100,00	41.011,87	0,44
30	Mata do Marilândia	64.560,10	89,14	553,39	0,01
11	Parque Natural Municipal da Lajinha	886.269,08	50,48	30,25	0,00
12	Mata da FAEFID UFJF	164.598,01	63,05	0	0,00
25	Mata do Cascatinha	49.787,23	51,11	0	0,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Os efeitos das alterações das coberturas florestais realizadas no CA1, CA2 e CA3 sobre a Bioenergia Inicial e de Equilíbrio das BELUs são apresentados na Figura 22. Foram destacadas BELUs com aumento ou diminuição de bioenergia em $\pm 0,5\%$ em relação ao cenário atual.

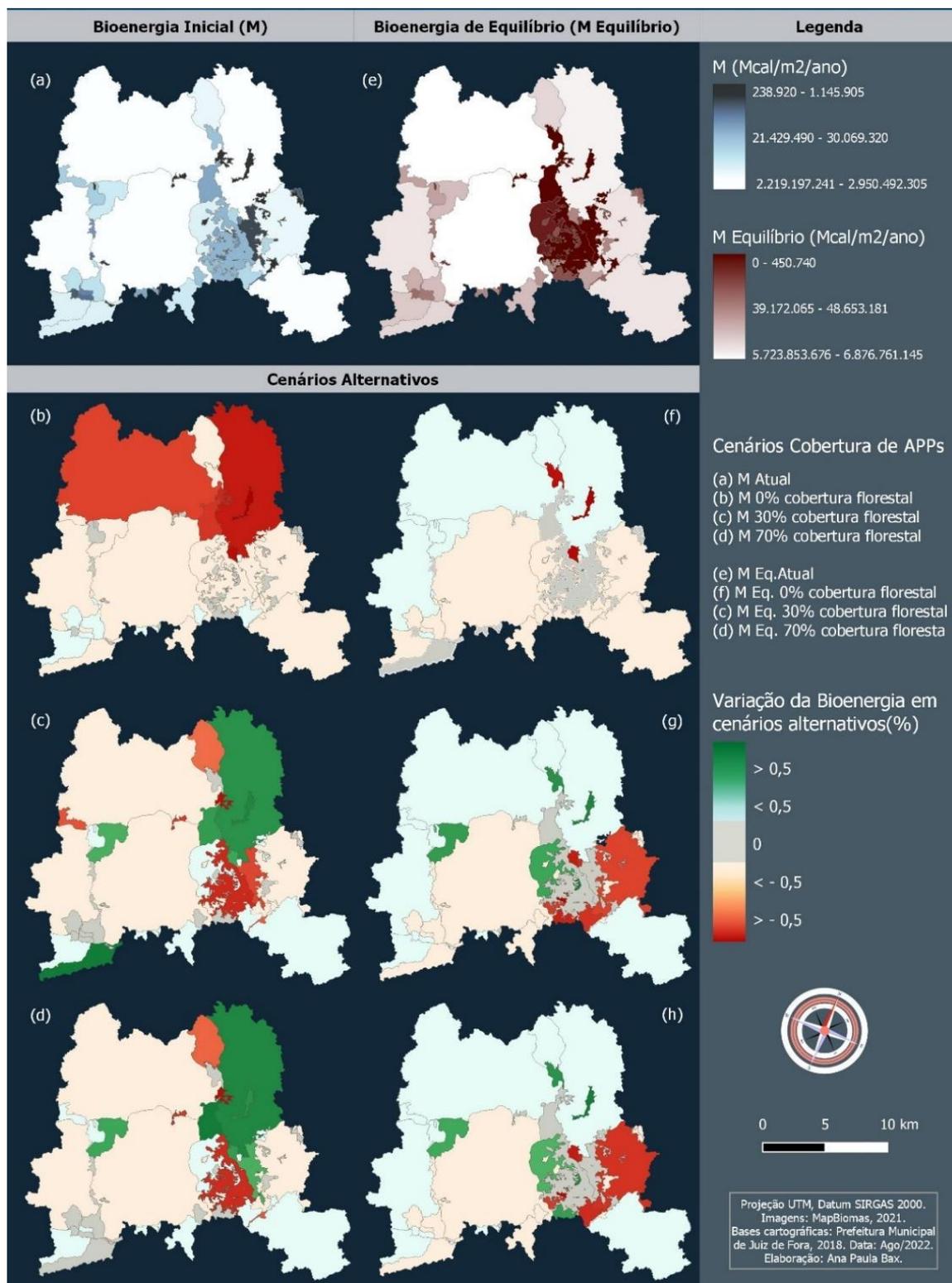


Figura 22 – Mapas de Bioenergia inicial (a, b, c, d) e de equilíbrio (e, f, g, h) por BELU nos cenários atual e alternativos. Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação à Bioenergia Inicial, para o CA1, em que toda a vegetação florestal das APPs foi suprimida, não houve aumento significativo de bioenergia em nenhuma BELU e houve diminuição entre $\cong 1,40\%$ e $4,10\%$ nas BELUs 66,70, 67, 72 e 3. Na BELU 73, a diminuição da Bioenergia Inicial foi de $\cong 50,55\%$.

Para o CA2 (cobertura florestal em 30% das APPs), houve aumento entre $\cong 0,90\%$ e $3,60\%$ nas BELUs 3, 46,70, 72 e 73 e na BELU 41, o aumento chegou a $\cong 7,10\%$. Para o mesmo cenário houve diminuição nas BELUs 4, 32, 56, 62, 63, 65, 67 e 74 variando de $\cong 0,60\%$ a $25,30\%$, e nas BELUs 67 e 17 a bioenergia diminuiu em $42,60\%$ e $68,20\%$, respectivamente.

Para o CA3 (cobertura em 70% das APPs), houve aumento entre $\cong 0,85\%$ e $3,56\%$ nas BELUs 74, 46, 3 e 73. A BELU 72 teve sua Bioenergia Inicial aumentada em $8,70\%$ e a BELU 70, em $16,20\%$. Por outro lado, nas BELUs 4, 63, 38, 62 e 65, variou negativamente em $\cong 0,60\%$ a $23,90\%$. A BELU 32 apresentou diminuição de $25,30\%$, a 67 de $38,50\%$ e a 17 de $68,20\%$.

Com relação à Bioenergia de Equilíbrio, no CA1 a BELU 35 apresentou aumento de $\cong 1.192,50\%$. A bioenergia oscilou negativamente nas BELUs 6 ($2,60\%$), 3 ($4,35\%$) e 73 ($47,50\%$). No CA2, houve aumento entre $\cong 0,60\%$ e $2,80\%$ para as BELUs 50, 25, 71 e 46. Na BELU 6 houve acréscimo de $45,80\%$, na 73 de $108,80\%$ e na 23 de $147,90\%$. No CA3, a variação negativa foi de $\cong 0,40\%$ a $0,80\%$ nas BELUs 10, 12, 13, 14 e 69. A Bioenergia de Equilíbrio variou negativamente nas Unidades 3 ($15,29\%$), 38 ($16,50\%$), 17 ($62,77\%$), 11 ($81,76\%$) e 32 ($99,92\%$). Por outro lado, a bioenergia aumentou nas BELUs 25 ($0,65\%$), 71 ($0,99\%$), 46 ($2,75\%$), 64 ($4,81\%$), 6 ($44,00\%$), 23 ($147,85\%$) e 73 ($221,33\%$).

Para o CA1 observa-se que, mesmo havendo diminuição considerável da Bioenergia Inicial, especialmente nas BELUs 3, 66, 67, 70, 72, 73, localizadas na porção norte do município, a vegetação de alto BTC presente nas BELUs 66 e 72 foi capaz de sustentar a Bioenergia Assintótica em grande parte do sistema, notadamente nas porções norte e oeste do município.

Para a simulação do CA1, não houve alterações significativas da Bioenergia Assintótica por m^2 em relação ao cenário atual, exceto pelas BELUs 35 (aumento de $1.092,48\%$), localizada no centro urbano do município, e BELU 3 (diminuição de $4,36\%$), localizada em região periurbana, porém contígua à BELU 10, área protegida do município, que também sofreu diminuição em sua bioenergia ($0,27\%$).

A BELU 33, mesmo apresentando altos níveis de bioenergia no cenário atual, é afetada negativamente em todos os cenários alternativos, podendo sinalizar os efeitos do impacto da área urbana como forte barreira aos fluxos energéticos, o que denota a necessidade de fortalecer a bioenergia e a conectividade das áreas urbanas e periurbanas. Outro fator importante para caracterizar sua dinâmica energética é sua centralidade na rede, discutido na seção 4.8.

Destaca-se o efeito benéfico do incremento da vegetação florestal dos CA2 e CA3 para a BELU 71, localizada em região periurbana e sob pressão de expansão urbana. O mesmo efeito é verificado na BELU 23, a Reserva do Monumento Natural Morro do Cristo, localizada em pleno centro urbano do município e podendo constituir importante *stepping stone* (ou trampolim) para promover a conectividade na área urbana. As *stepping stones* são definidos na Biogeografia de Ilhas como pequenas manchas que conectam outras manchas de vegetação isoladas e são fundamentais para promover a conectividade em áreas em que não é possível manter ou restaurar um habitat contíguo ou naquelas em que a paisagem é composta majoritariamente por pequenos fragmentos (MacARTHUR & WILSON, 1967; GILPIN, 1980; BAUM *et al.*, 2004).

Ressalta-se, no entanto, a necessidade de restabelecer sua ligação com outras áreas verdes da área urbana, como as BELUs 20, 21 e 22 (respectivamente Mata do Borboleta, Mata do Vale do Ipê e Mata do Bosque Imperial), atualmente com estruturas viárias funcionando como barreiras a separá-las. Essas BELUs compõem um corredor de áreas verdes contíguo à Unidade 71 (Milho Branco), que atualmente apresenta extensas superfícies desmatadas, com solo exposto e vestígios de queimadas. A BELU 34 é uma Unidade de Conservação (Reserva Biológica Santa Cândida) contígua à Unidade 71. Considerar a restauração de áreas da BELU 71, compatibilizando-as com a infraestrutura urbana, adotar ações educacionais para evitar queimadas e incrementar a conexão entre as BELUs 20, 21, 22, 23 e 34 por meio de passagens de fauna, por exemplo, certamente traria importantes benefícios em termos de conservação da biodiversidade e serviços ecossistêmicos para a população.

A Tabela 18 mostra os espaços naturais protegidos e áreas verdes urbanas que apresentaram variações da Bioenergia de Equilíbrio em relação ao cenário atual. As variações positivas, com incremento de bioenergia, são marcadas em verde; as

variações negativas em vermelho e aquelas que não sofreram variações são marcadas em cinza.

Para as BELUs 3, 10 e 11 observa-se diminuição da bioenergia nos três cenários alternativos, enquanto a BELU 25, que no cenário atual apresentou baixa Bioenergia de Equilíbrio, foi beneficiada com o incremento de 0,65% da bioenergia nos CA2 e CA3. As BELUs 23, 46 e 50 tiveram sua bioenergia aumentada nos CA2 e CA3.

Tabela 18 – Variações de Bioenergia de Equilíbrio para os espaços naturais protegidos e áreas verdes urbanas para os 3 Cenários Alternativos quando comparados ao cenário atual

BELU	Nome	CA1	CA2	CA3
3	Parque Estadual Mata do Krambeck	-4,36%	-15,25%	-15,29%
10	Jardim Botânico	-0,27%	-0,84%	-0,81%
11	Parque Natural Municipal da Lajinha	-0,01%	-81,27%	-81,76%
12	Mata da FAEFID UFJF	–	-73,20%	-0,41%
17	Mata do Bom Jardim	–	-62,77%	-62,77%
21	Mata do Vale do Ipê	–	0,26%	–
23	Monumento Natural Morro do Cristo	–	147,85%	147,85%
25	Mata do Cascatinha	0,02%	0,65%	0,65%
32	Mata de Lourdes	–	-99,92%	-99,92%
35	Museu Mariano Procópio	1.092,48%	-0,05%	-0,05%
38	Mata da Cervejaria Barbante	–	–	-16,51%
46	Mata do Ribeirão do Carmo	–	2,74%	2,74%
50	RPPN Fazenda Boa Vista	–	0,57%	0,03%

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 23 apresenta a variação dos fluxos de bioenergia entre a BELU 72 e Unidades adjacentes de 1º nível (vizinhas diretas). Em função do perfil de maior degradação das APPs, na BELU 72 foi realizada a maior parte das alterações de cobertura vegetal para as simulações. Verifica-se que os fluxos variaram positivamente em relação ao cenário atual para os CA2 e CA3, onde houve incremento da Formação Florestal para 30% e 70% das APPs, respectivamente. Ao contrário, no CA1, em que toda a vegetação florestal foi removida, o fluxo bioenergético diminuiu.

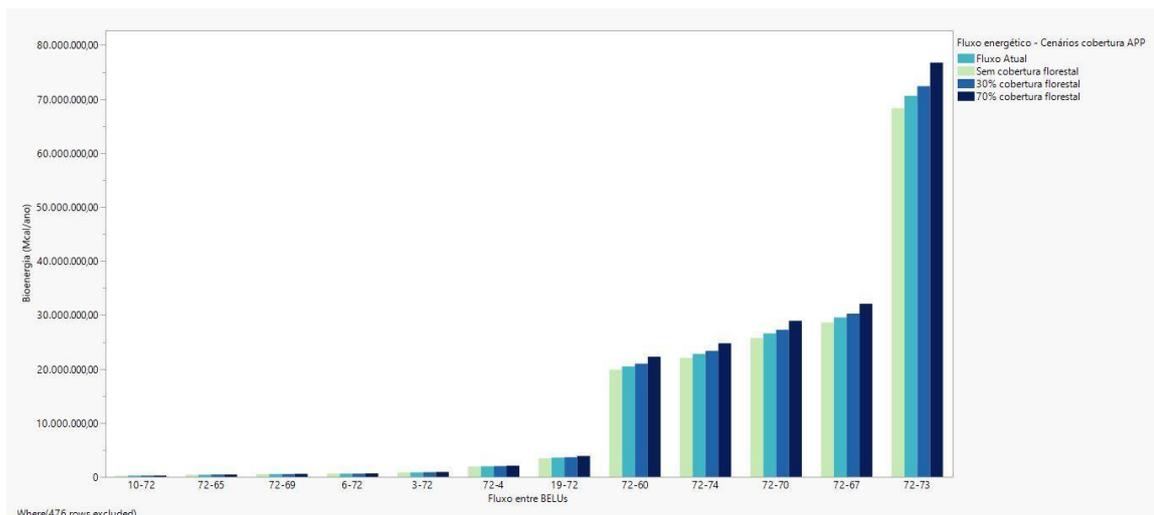


Figura 23 – Variação dos fluxos energéticos entre a BELU 72 e outras Unidades adjacentes de 1º nível. Fonte: Elaborado pela autora.

A relação entre os tipos e comprimento das barreiras, o índice de permeabilidade e o fluxo bioenergético para todo o sistema é apresentada na Figura 24.

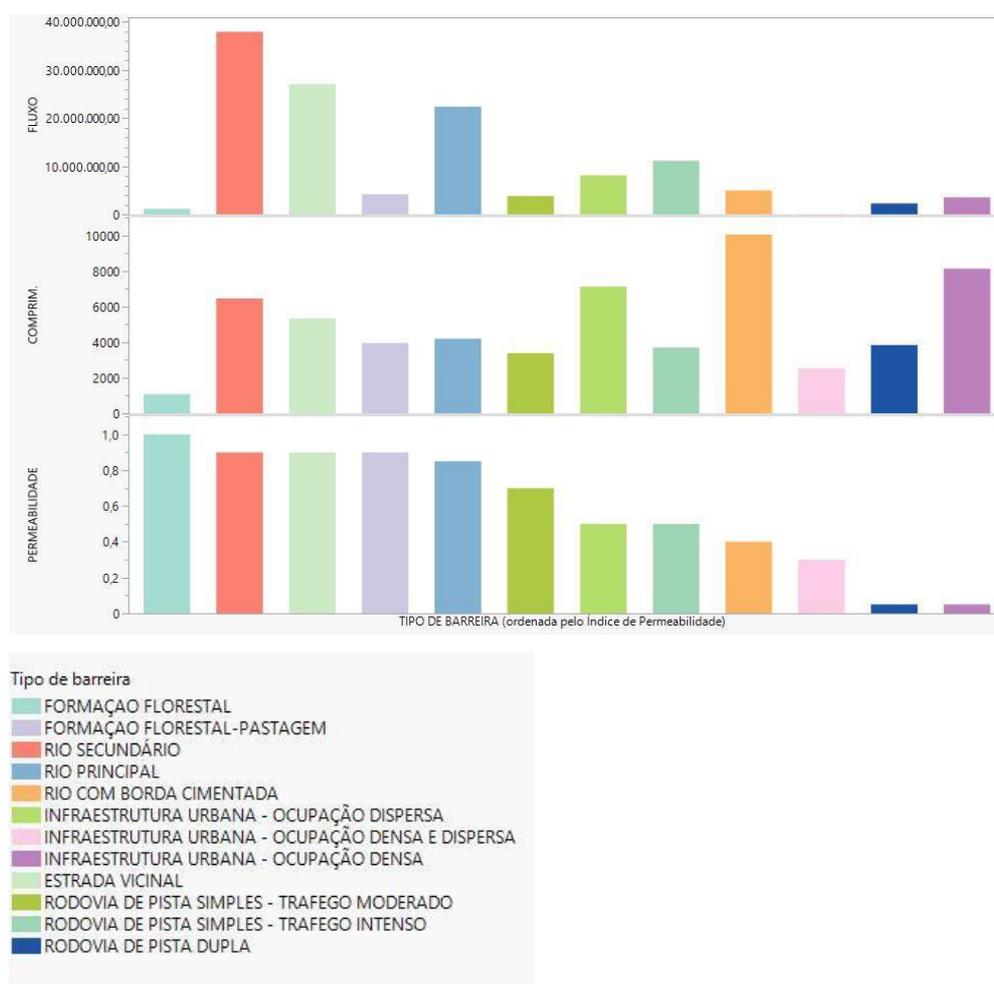


Figura 24 – Relação entre características das barreiras e o fluxo bioenergético entre BELUs. Fonte: Elaborado pela autora.

A delimitação das BELUs constituídas por espaços naturais protegidos é de origem legal, ainda que várias dessas áreas tenham barreiras antrópicas como limites. Assim, neste trabalho, algumas delas têm limites em contato com vegetação florestal, como o caso do Parque Estadual Mata do Krambeck e o Jardim Botânico da UFJF (Figura 17). Nesses casos, a permeabilidade foi considerada máxima. Ainda assim, em função da ocorrência e comprimento desse tipo de limite serem pequenos, o fluxo identificado foi mínimo, o que indica que muitas Unidade de Conservação e áreas verdes urbanas têm em suas fronteiras outros tipos de barreiras ou uso e cobertura do solo com potencial de restringir sua sustentabilidade, como as pastagens que têm comprimento e permeabilidade similares aos rios principais, mas com fluxo bioenergético menor. Para reverter esse quadro, é importante planejar a implantação de zonas de amortecimento para as UCs, mesmo para aquelas em que não há a obrigação legal para tanto. Poderiam ser consideradas as Unidades de Proteção e Incremento Ambiental (UPIAs) definidas no Plano Diretor Municipal.

O Plano Diretor municipal identificou fragmentos florestais em todo o município e classificou como UPIA aqueles fragmentos que deverão/poderão tornar-se espaços naturais protegidos no futuro. As UPIAs devem ser consideradas no planejamento paisagístico e urbano do município com áreas com níveis de proteção que também garantam uso recreativo pela população, naqueles casos em que não seja indicada seu uso mais restritivo para privilegiar a conservação da biodiversidade.

As rodovias, as infraestruturas urbanas e as bordas cimentadas do Rio Paraibuna constituem-se as barreiras mais fortes com impacto direto sobre o fluxo de bioenergia.

A Tabela 19 apresenta o somatório do fluxo energético em todo o sistema. Verifica-se que a supressão da vegetação das APPs resultou em diminuição do fluxo total em 0,84% e, por outro lado, a restauração promoveu o aumento geral de 0,41% para o CA2 e 1,32% para o CA3, denotando a contribuição das florestas nas áreas de mananciais para a sustentação bioenergética de todo o município.

Tabela 19 – Somatório e variação do fluxo bioenergético em todo o sistema nos cenários atual e alternativos.

Cenários	Fluxo bioenergia (Mcal/m ²)	Variação fluxos (%)
Atual	1.083.406.231,22	–
CA1	1.074.339.009,11	-0,84
CA2	1.087.853.722,75	+0,41
CA3	1.097.754.470,27	+1,32

Fonte: Elaborado pela autora.

Salienta-se que as variações nos fluxos (aumento na ordem de $\cong 2\%$ para o CA2 e $\cong 8\%$ para o CA3 e diminuição de $\cong 3\%$ para o CA1) foram consequência de alterações em áreas que representam menos de 1% do território do município, conforme demonstrado na Tabela 20. Tais resultados demonstram importância da conservação das Áreas de Preservação Permanente e a potência da floresta em promover a conectividade dos ecossistemas.

Tabela 20 – Variações da Bioenergia do Ecossistema (M_{tot}), da Bioenergia Generalizada (M^{astot}) e índice dMt_{tot} dos cenários alternativos.

Cenários	M_{tot} (Mcal/ano)	Variação (%)	M^{astot} (Mcal/ano)	Índice dMt _{tot} (%)
Atual	10.617.744.400,79	–	27.707.456.555,01	–
CA1	10.534.951.297,32	-0,78	27.715.765.222,20	+0,03
CA2	10.647.870.450,89	+0,28	27.748.025.968,01	+0,15
CA3	10.706.709.147,33	+0,84	27.747.788.462,92	+0,15

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 20 expõe a Bioenergia do Ecossistema (M_{tot}), com o mesmo padrão de aumento de energia encontrado anteriormente para os CA2 e CA3 e diminuição para o CA1. A Bioenergia Generalizada (M^{astot}) demonstra o aumento da bioenergia nos três cenários alternativos, o que aponta para a alta capacidade dos ecossistemas de ainda manterem-se sustentáveis ao longo do tempo, a despeito das pressões antrópicas do ambiente.

O índice dMt_{tot} demonstra o incremento geral da conectividade no sistema. Contudo, destaca-se que o índice dMt_{tot} para o CA1 0,12 pontos percentuais menor que nos demais cenários. No CA1, a área total em que a Formação Florestal foi suprimida corresponde a 1,25% do território de todo o município, conforme a Tabela 16. Outros estudos seriam necessários para avaliar a partir de que ponto e em quais locais a supressão florestal poderia afetar negativamente a Bioenergia Generalizada, quando comparada ao cenário atual. Além disso, a criação de novas barreiras de origem antrópica devido à implantação de infraestruturas adicionais também poderá afetar a dinâmica bioenergética do município. Isso não significa o impedimento de tal implantação, uma vez que as infraestruturas também são necessárias para garantir a qualidade de vida de populações humanas. No entanto, avaliações sistêmicas do impacto delas podem orientar escolhas de possibilidades locais ou indicar tecnologias alternativas que possam minimizar o impacto para garantir a saúde das populações e dos ecossistemas, com a manutenção de sua capacidade de fornecer

serviços ecossistêmicos aos cidadãos. A incorporação de estudos ao licenciamento ambiental e ao planejamento urbano pode aprimorar as ações de desenvolvimento municipal com vistas à manutenção da qualidade ambiental.

A análise detalhada de como as alterações na Bioenergia Generalizada afeta os fluxos de bioenergia entre as BELUs pode ajudar a esclarecer os motivos de o aumento da cobertura florestal em algumas regiões afetar negativamente outras. Acreditamos que as “avenidas” do fluxo bioenergético sejam fortalecidas em vias alternativas às do cenário atual, desviando o fluxo bioenergético daquelas BELUs cercadas por barreiras de menor permeabilidade. No entanto, estudos mais aprofundados são necessários e poderão indicar as melhores estratégias de implantação de florestas *stepping stones* por meio de restauração de áreas degradadas, conservação remanescentes florestais em áreas urbanas e fortalecimento da agricultura familiar e plantio de pomares com finalidade comercial nas áreas periurbanas do município (INGEGNOLI, 2019; ZHANG *et al.*, 2019). Além disso, é importante que as áreas usadas como corredores ou *stepping stones* entre habitats sejam também manejadas como habitats, contenham o máximo possível de vegetação nativa e sejam estruturalmente complexas e diversas (LYNCH, 2019).

4.8. ESTRUTURA DO BELG

Nesta seção, apresenta-se uma análise preliminar da estrutura do BELG, numa primeira aproximação para esclarecer as relações da estrutura da rede com a dinâmica energética do BELG. A estrutura da rede pode afetar a forma como conjuntos inteiros em interação respondem a perturbações (GUIMARÃES, 2020).

4.8.1 Disposição espacial e clusterização

Na representação da disposição espacial, não georeferenciada, das BELUs na rede, obtidas por meio do algoritmo de Yifan Hu (HU, 2005) e apresentada a seguir, os círculos representam as BELUs, denominadas por números, o diâmetro dos círculos corresponde à bioenergia (M) e a espessura das arestas, os fluxos de bioenergia entre as BELUs.

Na Figura 25 é apresentada a partição (ou clusterização) elaborada pelo Algoritmo de Leiden (TRAAG *et al.*, 2019). Foram obtidos 5 *clusters*, com qualidade de 0,7125.

O *cluster 1* é composto majoritariamente por BELUs localizadas na área urbana do município. No *cluster 2*, as BELUs localizam-se numa posição central no território e a leste do núcleo urbano, cortando o território de norte a sul. As Unidades integrantes dos *clusters 3 e 4* localizam-se em áreas rurais, a nordeste e sudoeste do território municipal, respectivamente, e o *cluster 5* localiza-se a sudeste do município.

A Tabela 21 apresenta a composição dos clusters.

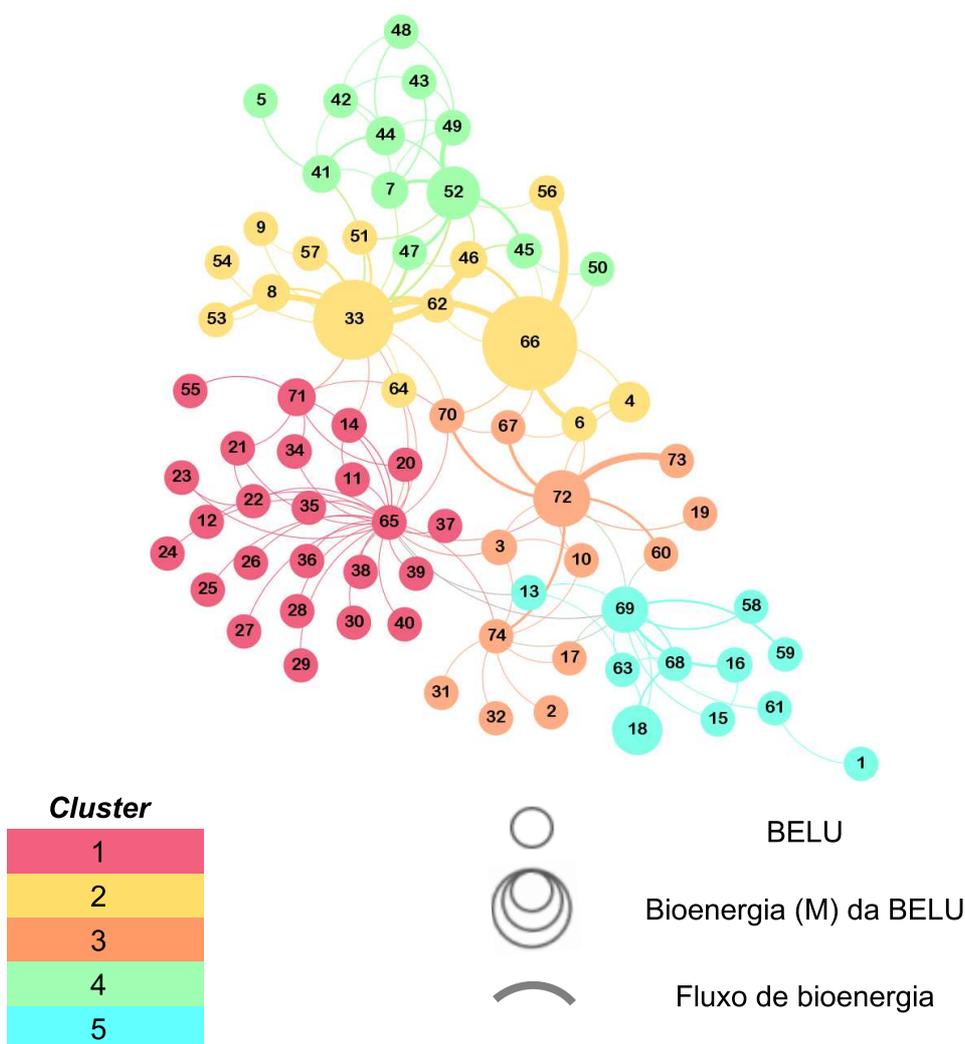


Figura 25 – Disposição da rede. A disposição espacial das BELUS foi obtida com a utilização do algoritmo Yifan Hu (HU, 2005) e clusterização do BELG pelo Algoritmo de Leiden (TRAAG *et al.*, 2019). Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 21 – Composição dos *clusters* obtidos por meio do Algoritmo de Leiden.

Cluster	BELUs
1	11, 12, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 55, 65 , 71
2	4, 6, 8, 9, 33 , 46, 51, 53, 54, 56, 57, 62, 64, 66
3	2, 3, 10, 17, 19, 31, 32, 60, 67, 70, 72 , 73, 74
4	5, 7, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 52
5	1, 13, 15, 16, 18 , 58, 59, 61, 63, 68, 69

Fonte: Elaborado pela autora.

4.8.2 Centralidades

A importância de um vértice em uma rede é denominada centralidade. Neste trabalho, analisamos as medidas de centralidade graus dos vértices e autovetor.

4.8.2.1 Distribuição dos graus dos vértices

O grau do vértice é definido como o número de arestas conectadas a ele. Esse atributo está relacionado à robustez do sistema (BARABÁSI & ALBERT, 1999). No BELG, as BELUs representam os vértices e o fluxo de energia entre elas, as arestas. A distribuição dos graus dos vértices do BELG é apresentada na Figura 26: As BELUs representadas pelos retângulos maiores têm o maior número de conexões. Verifique-se o grande número de BELUs com poucas conexões (retângulos menores).



Figura 26 – Classificação das BELUs pelos graus dos vértices do BELG. As BELUs representadas pelos maiores retângulos são aquelas com maior número de conexões. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 27 apresenta a distribuição dos graus dos vértices do BELG e a Tabela 22 apresenta o quantitativo de conexões (grau) de cada BELU. O grau médio dos vértices é 3,514.

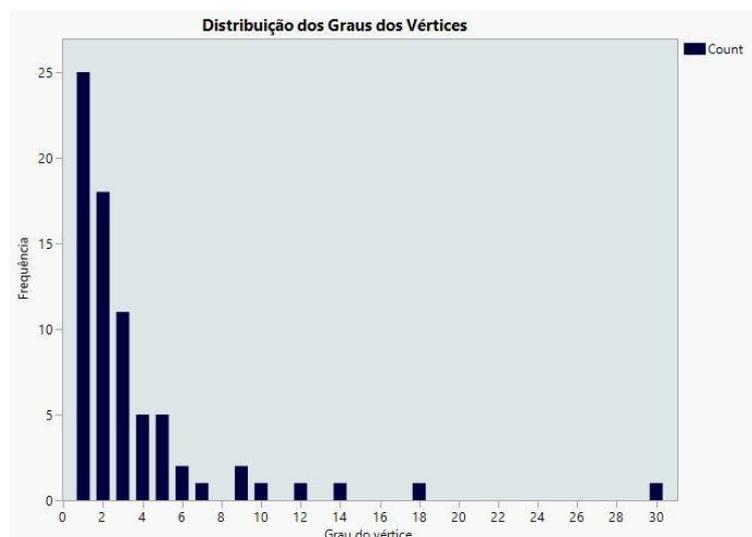


Figura 27 – Distribuição dos graus dos vértices do BELG. Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22 – Quantitativo de conexões (grau) das BELUs

Grau	BELU
30	65
18	33
14	69
12	72
10	66
9	52, 74
7	71
6	7, 70
5	41, 42, 44, 46, 49
4	3, 6, 45, 63, 67
3	4, 10, 13, 14, 18, 21, 22, 43, 47, 48, 68
2	8, 9, 11, 15, 16, 17, 20, 23, 34, 50, 51, 53, 56, 57, 60, 61, 62, 64
1	1, 2, 5, 12, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 54, 55, 58, 59, 73

Fonte: Elaborado pela autora.

A BELU 65 (Centro Urbano) é altamente conectada uma vez que neste trabalho foram individualizadas áreas verdes urbanas e Unidades de Conservação localizadas nesta região (Figura 25). A BELU 33 tem o segundo maior grau, seguida pelas Unidades 69 e 72, o que denota sua importância na centralidade do BELG.

A distribuição dos graus dos vértices do BELG apresenta características análogas às das redes biológicas, compostas por muitos vértices com poucas arestas e poucos vértices com muitas arestas (*hubs*). Essas características descrevem as Redes Complexas, descritas como redes livres de escala (FALOUTSOS *et al.*, 1999; BARABÁSI & ALBERT, 1999, ALBERT & BARABÁSI, 2002; BOCCALETTI *et al.*,

2006), e são utilizadas para representar a estrutura de sistemas complexos observados na realidade cotidiana.

A estrutura das redes complexas garante que a rede tenha grande resistência, pois a probabilidade de um *hub* ser afetado por uma falha aleatória é reduzida. Caso um nó de menor grau seja afetado, os demais deverão manter a conectividade por caminhos alternativos na rede. Entretanto, se os *hubs* principais forem afetados, a integridade da rede poderá ser comprometida (GILARRANZ *et al.*, 2017).

4.8.2.2 Autovetor (*Eigenvector Centrality*)

A centralidade de autovetor é apresentada na Figura 28. A graduação das cores indica a importância dos vértices no BELG.

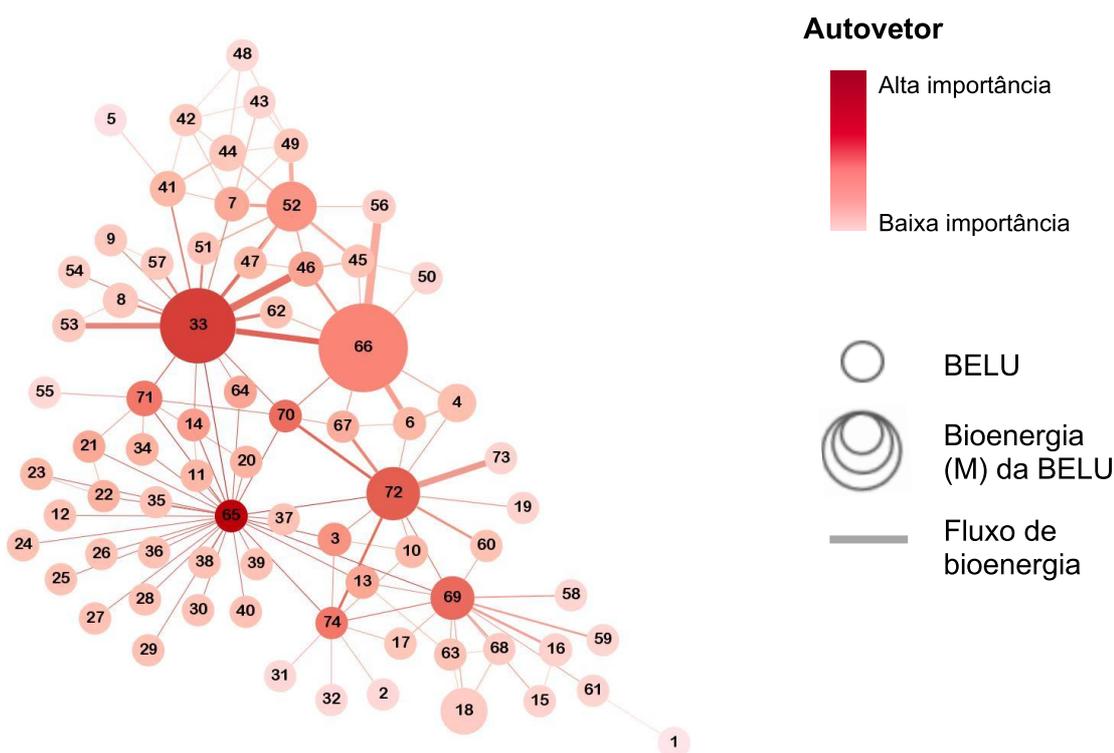


Figura 28 – Centralidade de autovetor do BELG. A graduação das cores indica a importância da BELU no BELG. Fonte: Elaborado pela autora.

Destaca-se a importância das BELUs 33, 46, 52, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 74 para o BELG em função de sua alta centralidade.

A centralidade do autovetor evidencia os vértices de baixo grau conectados a outros de alto grau. Nesses casos, sua centralidade será relativamente alta e, ao

contrário, quando um vértice de alto grau está ligado a outros de baixo grau, sua centralidade relativa será baixa (BONACICH, 2007).

Sendo assim, observa-se a influência da BELU 65 na relevância das Unidades componentes do *cluster* 1, indicando sua importância no BELG e na dinâmica energética de todo o sistema. A referida BELU, por sua vez, tem sua centralidade influenciada por outras de alto grau a que está conectada, como a 33, 69, 71, 72, 74. A BELU 33, que também apresenta alto grau, está conectada às BELUs 52, 65, 66, 70 e 71 com alta relevância na rede. As Unidades do *cluster* 5 têm relativa baixa importância uma vez que a maior parte delas tem baixo grau. Somente a BELU 69 está conectada às Unidades 65, 72 e 74.

A representação georeferenciada dos clusters e da centralidade de autovetor é demonstrada na Figura 29.

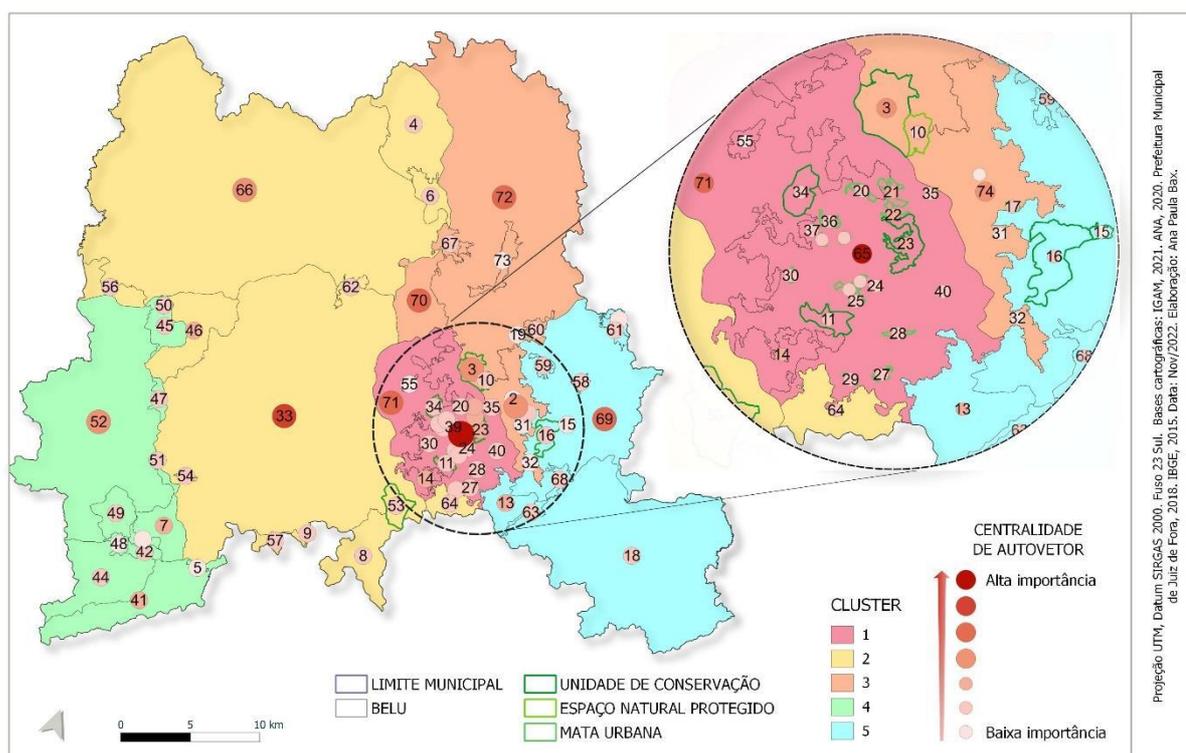


Figura 29 – Mapa dos clusters e centralidade de autovetor do BELG. Fonte: Elaborado pela autora.

4.9 DINÂMICA ENERGÉTICA ENTRE AS PARTIÇÕES DA REDE

A Tabela 23 individualiza a Bioenergia do Ecossistema (M_{tot}), a Bioenergia Generalizada (M^{astot}) e o índice dM_{tot} dos cenários alternativos por *cluster* de BELUs.

Tabela 23 – Variações da Bioenergia do Ecossistema (M_{tot}), da Bioenergia Generalizada (M^{astot}) e índice dMtot dos cenários alternativos individualizados em *clusters*.

<i>Cluster</i>	Cenários	M_{tot} (Mcal/ano)	Variação (%)	M^{astot} (Mcal/ano)	Índice dMtot (%)
1	Atual	314.376.973,8336	–	126.117.748,4325	–
	CA1	314.363.065,5704	-0,01	126.562.445,1625	+0,35
	CA2	308.410.228,5092	-1,90	136.495.398,0838	+8,23
	CA3	308.415.765,5093	-1,90	136.356.820,8598	+8,12
2	Atual	5.960.767.703,4100	–	14.380.968.528,9037	–
	CA1	5.918.332.577,7654	-0,71	14.385.195.250,0387	+0,03
	CA2	5.957.866.225,9614	-0,05	14.414.845.238,4163	+0,24
	CA3	5.956.130.089,9013	-0,08	14.415.167.847,3165	+0,24
3	Atual	1.237.256.987,5598	–	3.995.780.511,2271	–
	CA1	1.197.071.185,3842	-3,25	4.000.633.488,1537	+0,12
	CA2	1.264.506.398,2052	+2,20	4.000.350.129,2289	+0,11
	CA3	1.337.648.875,7791	+8,11	4.000.332.312,0978	+0,11
4	Atual	1.626.167.641,6497	–	4.520.153.240,3683	–
	CA1	1.626.167.578,0634	–	4.520.153.227,3136	–
	CA2	1.638.093.840,3549	+0,73	4.521.102.308,4351	+0,02
	CA3	1.625.562.747,5726	-0,04	4.521.296.646,6715	+0,03
5	Atual	1.479.175.094,3325	–	4.684.436.526,0798	–
	CA1	1.479.016.890,5366	-0,01	4.683.220.811,5253	-0,03
	CA2	1.478.993.757,8578	-0,01	4.675.232.893,8453	-0,20
	CA3	1.478.951.668,5651	-0,02	4.674.634.835,9785	-0,21

Fonte: Elaborada pela autora.

Todas as BELUs que compõem o *cluster* 1 possuem bioenergia relativamente baixa e representam, predominantemente, áreas verdes urbanas e espaços naturais protegidos localizados em área urbana ou periurbana. Tais áreas, apesar de apresentarem vegetação de boa qualidade, têm relativa baixa energia em função de suas dimensões reduzidas e conectividade impactada pela infraestrutura urbana.

De acordo com a Figura 22, essa região possui grandes áreas impermeabilizadas ($BTC = 0$), o que representa forte barreira para as trocas de genes, materiais e energia. Ainda assim, e mesmo integrando um *cluster* composto por Unidades com menor bioenergia, algumas delas (23, 35 71) tiveram sua Bioenergia Assintótica aumentada nos CA2 e CA3, conforme demonstrado na Figura 20. Essas BELUs representam áreas importantes para a conectividade do *cluster*, uma vez que manchas de habitat de alta qualidade podem sustentar a mobilidade das espécies em áreas em que não há vegetação diversa formando corredores (LYNCH, 2019).

Além disso, o *cluster* 1 apresentou a maior variação positiva de seu índice dMtot em todos os cenários alternativos, indicando o maior incremento de potência de conectividade pela restauração das APPs. Ou seja, tal *cluster* foi o que mais se beneficiou, em termos de conectividade, o que sinaliza, mais uma vez, os benefícios

em termos de sustentabilidade territorial e fornecimento de Serviços Ecossistêmicos para a população urbana que a restauração de APPs ou de terrenos degradados pode oferecer.

A BELU 33, que em todos os cenários alternativos refletiu piora em seus níveis de bioenergia, compõe o *cluster* 2, assim como a BELU 66. Essas duas Unidades apresentam os maiores níveis de Bioenergia Inicial do sistema e têm em suas adjacências BELUs com relativa baixa bioenergia. Apesar disso, o *cluster* 2 também apresentou variação positiva de seu índice dMt_{tot} para os 3 Cenários Alternativos.

De acordo com a Figura 22, diversas BELUs dos *clusters* 2, 3 e 4, localizadas em área rural e periurbana tiveram sua Bioenergia de Equilíbrio aumentada nos 3 Cenários Alternativos, como as Unidades 44, 46, 48, 52, 66 e 72, por exemplo.

O *cluster* 5 é composto por Unidades localizadas a sudeste e a leste do município, em áreas periurbanas. Algumas delas tiveram sua Bioenergia de Equilíbrio diminuída nos 3 Cenários Alternativos, como a BELU 13, 15, 16, 59 e 69. Seu índice dMt_{tot} variou negativamente, ao contrário dos demais *clusters*, o que pode indicar o impacto da infraestrutura urbana sobre sua dinâmica energética.

Com relação aos fluxos de bioenergia, verifica-se que os *clusters* 2 e 4 apresentam as maiores trocas entre as Unidades, refletindo sua maior sustentabilidade ao longo do tempo, conforme retratado na Figura 22.

A BELU 71, analisada aqui a título de individualização de caso, é diretamente conectada às BELUs 20, 21, 34, 55, 65 e 70, de menor bioenergia, e com a 33, que tem a segunda maior bioenergia do sistema. Apesar de o índice de permeabilidade da barreira entre as Unidades 71 e 33 ser de 0,05, o comprimento da barreira é o 2º maior para a BELU 71 (11.353,88 m), o que favoreceu o fluxo bioenergético (Tabela 24) e o incremento de Bioenergia Assintótica da Unidade 71 nos Cenários de Alternativos 2 e 3.

Tabela 24 – Fluxo bioenergético entre a BELU 71 e Unidades adjacentes.

Segmento	Permeabilidade	Comprim.(m)	Fluxo Atual (Mcal/ano)	Fluxo CA1 (Mcal/ano)	Fluxo CA2 (Mcal/ano)	Fluxo CA3 (Mcal/ano)
33-71	0,05	11.353,88	3.317.212,23	3.316.116,07	3.315.083,70	3.315.070,95
55-71	0,5	6.595,32	2.873.028,40	2.873.028,14	2.873.489,43	2.873.387,26
71-65	0,05	34.685,57	1.151.841,06	1.151.761,21	1.117.344,82	1.117.521,46
20-71	0,9	1.250,14	557.416,95	557.416,90	557.512,05	557.492,50
71-34	0,9	3.416,87	166.085,80	166.085,78	166.111,60	166.106,29

Segmento	Permeabilidade	Comprim.(m)	Fluxo Atual (Mcal/ano)	Fluxo CA1 (Mcal/ano)	Fluxo CA2 (Mcal/ano)	Fluxo CA3 (Mcal/ano)
71-70	0,05	3.999,41	160.455,77	160.102,14	160.745,19	163.301,97
71-21	1	1.532,46	66.053,57	66.053,57	66.070,48	66.062,38

Fonte: Elaborada pela autora.

A conectividade entre BELUs adjacentes (Equação XV) é condicionada pelo metabolismo da vegetação e limitada pela extensão e permeabilidade das barreiras existentes entre elas. A ocorrência de Unidades com baixa bioenergia nas adjacências imediatas de outras pode provocar variações negativas na Bioenergia Assintótica (BONACINI *et al.*, 2017; CHENG *et al.*, 2018; WANGHE *et al.*, 2020; ASSUMA *et al.*, 2021) mesmo daquelas BELUs com maior área e vegetação de alta qualidade (Unidades com maior BTC), como o caso da BELU 33, por exemplo. A Unidade apresenta a segunda maior bioenergia do sistema, mas parece ser afetada pela presença de fortes barreiras como área urbana, presentes no *cluster* 1, e unidades de baixa bioenergia presentes em suas adjacências imediatas e no *cluster* 4 (Figura 25).

No entanto, comparativamente com outras BELUs, as áreas com baixos valores de Bioenergia Assintótica contribuíram com menor conectividade da paisagem para todo o ecossistema (PELOROSSO *et al.*, 2017; WANGHE *et al.*, 2019).

Esses resultados indicam que Unidades com alta bioenergia podem individualmente sofrer impacto das adjacências de baixa energia (Figura 28), mas no cômputo geral, sua saúde em termos bioenergéticos ainda é capaz de, através dos fluxos de bioenergia, manter a sustentabilidade das subredes que compõem e contribuir com a sustentabilidade de todo o sistema. Os caminhos que distinguem redes conectadas em níveis organizacionais mais elevados podem apontar para uma ampla gama de efeitos indiretos que operam em várias dimensões geográficas, temporais e organizacionais do BELG (GUIMARÃES, 2020).

As análises aqui apresentadas constituem uma aproximação da dinâmica dos fluxos entre BELUs, que funcionam como um sistema integrado de subredes ou subsistemas. Diversos subsistemas simples compõem sistemas reais maiores. No entanto, os sistemas menores, quando analisados juntos, apresentam comportamentos que não refletem forçosamente uma sobreposição linear dos comportamentos desses subsistemas considerados separadamente (COSTA, 2004). Dessa forma, estudos que avaliem os fluxos bioenergéticos entre BELUs como um conjunto de redes acopladas podem esclarecer com maiores detalhes a dinâmica dos

fluxos energéticos entre as Unidades e os caminhos da bioenergia no sistema, tornando mais claros os meios pelos quais uma pequena alteração de cobertura vegetal em uma BELU pode afetar significativamente a dinâmica bioenergética de outras BELUs, ainda que distantes espacialmente, e de todo o sistema.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se um estudo de caso em que foram avaliadas as respostas no cenário bioenergético às mudanças no uso e cobertura do solo de áreas de mananciais hídricos do município de Juiz de Fora/MG. Foram realizadas simulações com alterações nos percentuais de cobertura florestal das Áreas de Preservação Permanente (APPs) e os resultados foram comparados aos dados obtidos para o cenário atual. Constatou-se que alterações na cobertura vegetal de pequenas áreas podem afetar significativamente o cenário bioenergético e a conectividade sistêmica da paisagem. A dinâmica bioenergética de Unidades Territoriais é afetada pela capacidade de produção de bioenergia e condicionada pelas barreiras entre BELUs adjacentes.

Para fortalecer ou restabelecer a conectividade e a capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos para populações humanas, o planejamento paisagístico e urbano precisa considerar a conservação de remanescentes florestais urbanos e periurbanos e a restauração áreas degradadas presentes no território. As áreas de baixa Bioenergia Assintótica podem ser restauradas para que tenham a função de *stepping stones* para a conexão dos fragmentos inseridos ou próximos às áreas urbanas e outras áreas mais potentes em termos bioenergéticos, de modo que, ao estabelecer ou aumentar os fluxos bioenergéticos, tais áreas tornem-se mais saudáveis e resistentes a impactos.

A análise da conectividade estrutural propiciada por PANDORA pode apoiar as decisões relacionadas ao planejamento paisagístico e urbano, subsidiando-as com informações que visem a sustentabilidade ambiental dos territórios a partir de dados geográficos facilmente acessíveis

É importante considerar a acurácia dos modelos, uma vez que não refletem a complexidade dos atributos dos objetos de estudo em sua totalidade, o que não diminui a importância desse tipo de ferramenta de gestão.

Por fim, sugere-se o desenvolvimento de estudos que avaliem os fluxos bioenergéticos entre BELUs como um conjunto de redes dinâmicas acopladas com o objetivo de esclarecer mais detalhadamente a dinâmica dos fluxos energéticos entre BELUs.

REFERÊNCIAS

AGA KHAN FOUNDATION. **Grow**: the microforest initiative. 2022. Disponível em: <<http://www.akflearninghub.org>>. Acesso em: 11 nov 2022.

ALBERT, R. & BARABÁSI, A.L. Statistical mechanics of complex networks. **Rev. Mod. Phys.**, v.74, n.1, p. 47-97, 2002. DOI:10.1103/RevModPhys.74.47.

ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T.; WITNER, H. E. **Sistema de classificação do uso da terra e do revestimento do solo para utilização com dados de sensores remotos**. Tradução de Harold Strang. Rio de Janeiro: IBGE. (Série Paulo de Assis Ribeiro, n. 9). 1979. 78p.

ASSUMMA, V.; BOTTERO, M.; DE ANGELIS, E.; LOURENÇO, J. M.; MONACO, R.; SOARES, A.J. A decision support system for territorial resilience assessment and planning: an application to the Douro Valley (Portugal). **Science of The Total Environment**, v.756, 2021, 143806. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.143806.

AUMOND, J. J. Teoria dos sistemas: uma nova abordagem para a recuperação e restauração ambiental. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2., 2003, Itajaí. **Anais...** Itajaí: UNIVALI, 2003. p. 43-49.

BARABÁSI, A.L. & ALBERT, R. Emergence of Scaling in Random Networks. **Science**, v.286, p. 509-512, 1999.

BARRET, G.W. & PELES, J.D. **Landscape ecology of small mammals**. Springer: New York, 1999.

BASTIAN M., HEYMANN S., JACOMY M. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. **International AAAI Conference on Weblogs and Social Media**. 2009.

BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. 256p.

BASTOS, W.L, FILHO, J.T.A, CASTRO, N.B., CID, W.; OLIVEIRA, A. **História Econômica de Juiz de Fora**. Instituto Histórico e Geográfico de Juiz de Fora, 1987.

BAUM, K., HAYNES, K; DILLEMUTH, F.; CRONIN, J. The matrix enhances the effectiveness of corridors and stepping stones. **Ecology**. V.85, p. 2671-2676, 2004. DOI:10.1890/04-0500.

BOCCALETTI, S., LATORA, V., MORENO, Y., CHAVEZ, M., HWANG, D.-U. Complex networks: Structure and dynamics. **Physics Reports**, v. 424, p.175-308, 2006. DOI:10.1016/j.physrep.2005.10.009.

BONACICH, P. Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification. **The Journal of Mathematical Sociology**, v.2, n.1, p.113-120, 1972. DOI:10.1080/0022250X.1972.9989806.

BONACICH, P. Some unique properties of eigenvector centrality. **Social Networks**, v.29, n. 4, p. 555-564, 2007. DOI:10.1016/j.socnet.2007.04.002.

BONACINI, E., GROPPPI, M., MONACO, R., SOARES, A., & SORESINA, C. A network landscape model: Stability analysis and numerical tests. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v.48, p.569-584, 2017. DOI:10.1016/j.cnsns.2017.01.013.

BORGES, A. F., TIMBÓ, M. A., NERO, M. A., & TEMBA, P. DA C. Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros. **Revista Geografias**, p. 45-63. DOI:10.35699/2237-549X.13414.

BORRETT, S.R., R.R. CHRISTIAN, R.R., ULANOWICZ, R.E. Network Ecology. *In: Encyclopedia of Environmetrics*, EL-SHAARAWI A.-H. & PIEGORSCH, W. (eds), John Wiley & Sons Ltd: Chichester, UK, p. 1767-1772, 2012. DOI:10.1002/9780470057339.van011.pub2.

BOT, A.J.; NACHTERGAELE, F.O. & YOUNG, A. **Land resource potential and constraints at regional and country levels**. Rome, Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization, 2000. 114p.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRASIL. **Lei Federal n.º 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 138, n. 8, p. 1-6, 19 jul. 2000.

BRUNSELL, N.A.; SCHYMANSKI, S.J.; KLEIDON A. Quantifying the thermodynamic entropy budget of the land surface: is this useful? **Earth Syst Dyn**, v. 2, n. 26, p. 87–103, 2011.

BÜTTNER, G.; KOSZTRA, B.; MAUCHA, G.; PATAKI, R. **Implementation and achievements of CLC2006**. Revised Final Draft, 2012.

CAPRA, F. **A teia da vida**: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1996. 256 p.

CAMERANO, L. On the equilibrium of living beings by means of reciprocal destruction. *Atti della Reale Accademia delle Scienze*, Torino, v.15, n. 8, p. 393-414, 1880. Disponível em: <<https://lab.rockefeller.edu/cohenje/PDFs/222Camerano18801.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2022.

CANTWELL, M.D.; FORMAN, R.T.T. Landscape graphs: ecological modeling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes. **Landsc. Ecol.**, v. 8, p.239–255, 1993. DOI: 10.1007/BF00125131.

CAZM. Concessionária do Aeroporto Regional da Zona da Mata, 2022. **Institucional**. 2022. Disponível em: <<http://www.zonadamata-aero.com.br/o-aeroporto/institucional>>. Acesso em: 07 mai. 2022.

CBH-PS1. COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS AFLUENTES MINEIROS DOS RIOS PRETO E PARAIBUNA. **Rio Paraíba do Sul**. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Preto e Paraibuna. Produto Final 05: Complementação e Finalização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba Do Sul - PIRH-PS e Elaboração dos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas Afluentes. PROFILL Engenharia e Ambiente S.A., 2019, 576 p. Disponível em: <<https://www.ceivap.org.br/downloads/cadernos/PS1.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

CESAMA. **Mananciais**. 2022. Disponível em: <<https://cesama.com.br/mananciais/barragem-de-chapeu-d-uvas-2>>. Acesso em 17 mai 2022.

CHENG, F.; LIU, S.; HOU, X.; ZHANG, Y.; DONG, S. Response of bioenergy landscape patterns and the provision of biodiversity ecosystem services associated with land-use changes in Jinghong County, Southwest China. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 5, p. 783–798, 2018. DOI: 10.1007/s10980-018-0634-z.

COPERNICUS PROGRAMME. **About Copernicus Land Monitoring Service**. 2022. Disponível em: <<https://land.copernicus.eu/en/about>>. Acesso em: 31 mai 2022.

COSTA, L. F. Bioinformatics: perspectives for the future. **Genet Mol Res.**, v.3, n. 4, p. 564-74, 2004.

COULON, A.; COSSON, J.F.; ANGIBAULT, J.M.; CARGNELUTTI, B.; GALAN, M.; MORELLET, N.; PETIT, E.; AULAGNIER, S.; HEWISON, J.M. Landscape connectivity influences gene flow in a roe deer population inhabiting a fragmented landscape: an individual-based approach. **Molecular ecology**, v.13, p. 2841-4850, 2004.

DINIZ, C. **Três Décadas de Mudanças na Planície Costeira Brasileira**: o status dos manguezais, da aquicultura e salicultura a partir de séries temporais Landsat e técnicas de aprendizado de máquina, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará – UFPA, 2021.

DRUMMOND, G.M.; MARTINS, C.S.; MACHADO, A.B.M.; SEBAIO, F.A.; ANTONINI, Y. (orgs.). **Biodiversidade em Minas Gerais, um atlas para sua conservação**. 2ª ed. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2005. 222 p.

EEA - European Environment Agency. **Task Force: CORINE Land Cover**. A European Community project, 1992. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover/at_download/file>. Acesso em: 25 fev. 2021.

EKLOF, A., HELMUS, M. R., MOORE, M., ALLESINA, S. Relevance of evolutionary history for food web structure. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 279, p.1588-1596, 2012.

FAHRIG, L. & PALOHEIMO, J. Determinants of local population size in patchy habitats. *Theoretical Population Biology*, v.34, n. 2, p. 194-213, 1988.

FALOUTSOS, M.; FALOUTSOS, P.; FALOUTSOS, C. On power-law relationships of the Internet topology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 29 n. 4, p. 251–262, 1999. DOI:10.1145/316194.316229.

FOLTÊTE, J.-C.; CLAUZEL, C.; VUIDEL, G. A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software*, v. 38, p. 316-317, 2012. DOI:10.1016/j.envsoft.2012.07.002.

FOLTÊTE, J.-C.; GIRARDET, X.; CLAUZEL, C. A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning. *Landsc. Urban Plan.* v.124, p.140–150, 2014. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.012.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Aqui tem mata?** 2022. Disponível em: <<http://aquitemmata.org.br/#/>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

GIBBS, J.P. Demography versus habitat fragmentation as determinants of genetic variation in wild populations. *Biological Conservation*, v.100, p. 15-20, 2001.

GILARRANZ, L.J., RAYFIELD, B., LIÑÁN-CEMBRANO, G., BASCOMPTE, J., GONZÁLEZ, A. Effects of network modularity on the spread of perturbation impact in experimental metapopulations. *Science*, v.357, p.199–201, 2017. DOI:10.1126/science.aal4122.

GILPIN, M. E. The role of stepping-stone islands. *Theoretical Population Biology* v.17, p. 247–253, 1980. DOI:10.1016/0040-5809(80)90009-x.

GOBATTONI, F.; GROPPPI, M.; MONACO, R.; PELOROSSO, R. New Developments and Results for Mathematical Models in Environment Evaluations. *Acta Applicandae Mathematicae*, v. 132. N.1, 2014. DOI:10.1007/s10440-014-9916-x.

GOBATTONI, F.; LAURO, G.; MONACO, R.; PELOROSSO, R. Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests. *Acta Appl. Math*, v. 125, p. 173–192, 2012. DOI: 10.1007/s10440-012-9786-z.

GOBATTONI, F.; PELOROSSO, R.; LAURO, G.; LEONE, A.; MONACO, R. A procedure for mathematical analysis of landscape evolution and equilibrium scenarios assessment. *Landscape and Urban Planning*, v.103, p. 289-302, 2011. DOI:10.1016/j.landurbplan.2011.08.011.

GRASS. Development Team. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software**, Version 7.8. Open Source Geospatial Foundation, 2020.

GUIMARÃES, P. R. The Structure of Ecological Networks Across Levels of Organization. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 51, n.1, p. 433-460, 2020. DOI:10.1146/annurev-ecolsys-012220-120819.

HADDAD, N.M.; BRUDVIG, L.A.; CLOBERT, J.; DAVIES, K.F.; GONZALEZ, A.; HOLT, R.D.; LOVEJOY, T.E.; SEXTON, J.O.; AUSTIN, M.P.; COLLINS, C.D.; COOK, W.M.; DAMSCHEN, E.I.; EWERS, R.M.; FOSTER, B.L.; JENKINS, C.N.; KING, A.J.; LAURANCE, W.F.; LEVEY, D.J.; MARGULES, C.R.; MELBOURNE, B.A.; NICHOLLS, A.O.; ORROCK, J.L.; SON, D-X.; TOWNSHEND, J.R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, v. 1, n. 2, e1500052, 2015. DOI:10.1126/sciadv.1500052. Sci Adv 1:e1500052.

HARARY, F. **Graph theory**. Addison-Wesley, 1969.

HIPP, R.D. **SQLite**, 2020. Disponível em: <<https://www.sqlite.org/index.html>>.

HU, Y. Efficient and high quality force-directed graph drawing. **Mathematica Journal**, v. 10, p.37-71, 2005.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa Clima do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE. 2002.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resolução da Presidência do IBGE nº. 1/2005**. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Acesso e uso de dados geoespaciais**. Coordenação de Cartografia. - Rio de Janeiro: IBGE, 2019a. 143 p. : il.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Áreas Urbanizadas do Brasil 2019**. 2019b. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>>. Acesso em: 18 out 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA. **Base Cartográfica Continua Do Brasil, Escala 1:250.000 - BC250**: versão 2021. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria de Geociências, 2021a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/basescartograficas/#/home>>. Acesso 21 mar 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA. **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5930>>. Acesso 25 mar 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sidra: sistema IBGE de recuperação automática**. Rio de Janeiro, 2021c. Disponível em: <<http://sidra.ibge.gov.br/acervo>>. Acesso em: 25 mar. 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão Territorial Brasileira – DTB 2021**. 2022a. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>>. Acesso 18 out. 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2021**. 2022b. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>>. Acesso 18 out 2022.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Metadados : IBGE - CLIMA ES**. 2022c. Disponível em: <https://ide.geobases.es.gov.br/layers/geonode:ibge_clima_v1_es_epsg_31984/metadata_detail>. Acesso em: 17 out 2022.

IGAM. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Base Hidrográfica Ottocodificada do rio Paraíba do Sul**. 2020. Disponível em: <https://geoserver.meioambiente.mg.gov.br/IDE/ows?service=WFS&version=1.0.0&request=GetFeature&typeName=IDE%3Aide_0101_pe_hidro_otto_lin&maxFeatures=10000000&outputFormat=SHAPE-ZIP>. Acesso em: 12 ago. 2021.

INGEGNOLI, V. **Landscape Ecology**: A Widening Foundation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002.

INGEGNOLI, V. **Landscape Bionomics**: Biological-Integrated Landscape Ecology. Springer Verlag, Heidelberg, Milan, New York, 2015. DOI:10.1007/978-88-470-5226-0.

INGEGNOLI, V. **The Need of Agrarian Landscapes Rehabilitation to support the regulation capacity of the Earth Running**: Healthy Agrolandscapes support Earth regulation capacity. 2019. DOI:10.13140/RG.2.2.26772.96647.

JOLY C.A.; SCARANO F.R.; SEIXAS C.S.; METZGER J.P.; OMETTO J.P.; BUSTAMANTE M.M.C.; PADGURSCHI M.C.G.; PIRES A.P.F.; CASTRO P.F.D.; GADDA T.; TOLEDO P. (eds.). **1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos**. São Carlos: Editora Cubo, 2019. 351p. DOI:10.4322/978-85-60064-88-5.

JUIZ DE FORA. Câmara Municipal. **Lei complementar n. 82, de 03 de julho de 2018**. Dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Urbano e Territorial, o Sistema Municipal de Planejamento do Território e a revisão do PDP/JF de Juiz de Fora conforme o disposto na Constituição Federal e no Estatuto da Cidade e dá outras providências. Juiz de Fora: Paço da Prefeitura de Juiz de Fora, 3 de julho de 2018a. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/plano_diretor/pdp_lc82.18_00.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2021.

JUIZ DE FORA. **Sistema de Informações Geográficas de Juiz de Fora**, 2018b. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/sistema_informacoes/index.php>. Acesso em: 21 fev. 2021.

KAISER-BUNBURY, C.N., MOUGAL, J., WHITTINGTON, A.E., VALENTIN, T., GABRIEL, R., OLESEN, J.M., BLÜTHGEN, N. Ecosystem restoration strengthens pollination network resilience and function. **Nature**, v.542, p.223–27, 2017. DOI:10.1038/nature21071.

LESSA, J. **Juiz de Fora e seus pioneiros** (Do Caminho Novo à proclamação). Ed. Universidade Federal de Juiz de Fora: Juiz de Fora, 1985.

LIMA, V.C.; LIMA, M.R.; MELO, V.F. Classificação brasileira de solos. *In*: LIMA, V.C.; LIMA, M.R.; MELO, V.F. (Eds.). **O solo no meio ambiente**: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007. p. 77-88.

LINDENMAYER, D.B., T.W. CLARK, R.C. LACY & V.C. THOMAS. Population viability analysis as a tool in wildlife conservation policy: with reference to Australia. **Environmental Management**, v.17, p. 745–758, 1993.

LINEHAN, J., GROSS, M., FINN, J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. **Landsc. Urb. Plann.**, v. 33, p. 179-193, 1995.

LOEUILLE, N. Influence of evolution on the stability of ecological communities. **Ecol. Lett**, v.13, n. 12, p.1536-1545, 2010. DOI:10.1111/j.1461-0248.2010.01545.x.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Erodibilidade de solos paulistas**. Boletim Técnico, Instituto Agrônomo, Campinas, n.27, 1975. 12 p.

LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M.F., Maguire, D.J. Rhind, D.W. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. Tradução André Schneider *et al.* 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.

LOPES, A.S. & GUILHERME, L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. *In*: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.1-64.

LYNCH, A. J. Creating Effective Urban Greenways and Stepping-stones. **Journal of Planning Literature**, v.34, p.131–155, 2019. DOI:10.1177/0885412218798334.

MacARTHUR, R.H. & WILSON E. The theory of island biogeography. **Princeton University Press**, Princeton, 1967.

MACHADO, P. J. O. **Uma proposta de zoneamento ambiental para a Bacia Hidrográfica da Represa de São Pedro – Juiz de Fora/MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 1998.

MATSUDA, H.; OGITA, N.; SASAKI, A.; SATO, K. Statistical Mechanics of Population: The Lattice Lotka-Volterra Model. **Prog. Theor. Phys.** v.88, p.1035–1049, 2013.

MATURANA, H.; VARELA, F. **De máquinas a seres vivos: autopoiese – a organização do vivo**. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997. 138 p.

MCKINNEY, M. L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. **Biological Conservation**, v.127, n.3, p.247-260, 2006. DOI: 10.1016/j.biocon.2005.09.005.

METZGER, J.P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, v. 1, n. 1–2, p. 1–9, 2001. DOI:10.1590/S1676-06032001000100006.

MEYSMAN, F.J.R. & BRUERS, S. Ecosystem functioning and maximum entropy production: a quantitative test of hypotheses. **Philos. Trans. R. Soc. B.**, v.365, n. 1545, p.1405-1416, 2010. DOI:10.1098/rstb.2009.0300.

MICROSOFT. **Microsoft Excel 2016**. 2015.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis**. Washington, DC: World Resources Institute, 2005. 86 p.

MITTERMEIER, R.A.; GIL, P.R.; HOFFMAN, M.; PILGRIM, J.; BROOKS, t.; MITTERMEIER, C.G.; LAMOUREUX, J.; FONSECA G.A.B. **Hotspots revisited. Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions**. CEMEX: Mexico, 2004. 392 p.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; FONSECA, G.A.B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v.403, p. 853-858, 2000.

MONACO, R.; NEGRINI, G.; SALIZZONI, E.; JACINTA, A.; VOGHERA, A. Inside-outside park planning: A mathematical approach to assess and support the design of ecological connectivity between Protected Areas and the surrounding landscape. **Ecol. Eng.**, v. 149, p.105748, 2020. DOI:10.1016/j.ecoleng.2020.105748.

NASCIMENTO, D. T. F.; LUIZ, G. C.; OLIVEIRA, I. J. Panorama dos sistemas de classificação climática e as diferentes tipologias climáticas referentes ao estado de Goiás e ao Distrito Federal (Brasil). **Élisée, Rev. Geo.** v.5, n.2, p.59-86, jul./dez. 2016.

NG, C.N.; XIE, Y.J.; YU, X.J. Integrating landscape connectivity into the evaluation of ecosystem services for biodiversity conservation and its implications for landscape planning. **Appl Geogr**, v. 42, n. 4, p.1–12, 2013.

NIMER, E. Um modelo metodológico de classificação de climas. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 41, p. 59-89, 1979.

NOCELLI, G. 250 produtores de eucalipto têm prejuízo com Arcelor. **Tribuna de Minas**, Juiz de Fora, 2016. Disponível em: <<https://tribunademinas.com.br/noticias/economia/23-06-2016/250-produtores-de-eucalipto-tem-prejuizo-com-arcelor.html>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

ODUM, E. P. The Strategy of Ecosystem Development: An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. **Science**, v. 164, p. 262-270, 1969. DOI: 10.1126/science.164.3877.262.

ODUM, H.T. **Systems ecology**. Wiley: New York, 1983.

ODUM, W.E., ODUM, E.P. & ODUM, H.T. Nature's pulsing paradigm. **Estuaries**, v. 18, p. 547–555, 1995. DOI: 10.2307/1352375.

PARDINI, R., SOUZA, S.M., BRAGA-NETTO, R. & METZGER, J.P. The role of forest structure, fragment size and corridors in maintaining small mammal abundance and diversity in a tropical forest landscape. **Biol. Conserv.**, v. 124, p.253-266, 2005. DOI:10.1016/j.biocon.2005.01.033.

PELOROSSO, R.; APOLLONIO, C.; ROCCHINI, D.; PETROSELLI, A. Effects of Land Use-Land Cover Thematic Resolution on Environmental Evaluations. **Remote Sensin**, v. 13, n. 1232, 2021. DOI:10.3390/rs13071232.

PELOROSSO, R.; GOBATTONI, F.; GERI, F.; LEONE, A. PANDORA 3.0 plugin: A new biodiversity ecosystem service assessment tool for urban green infrastructure connectivity planning. **Ecosyst. Serv.** v. 26, p. 476–482, 2017. DOI:10.1016/j.ecoser.2017.05.016.

PELOROSSO, R.; GOBATTONI, F.; GERI, F.; MONACO, R.; LEONE, A. Bio-Energy Connectivity and Ecosystem Services: Aa Assessment by Pandora 3.0 Model for Land Use Decision Making. **Journal of Land Use, Mobility and Environment**, p. 815-816, 2014.

PELOROSSO, R.; GOBATTONI, F.; GERI, F.; MONACO, R.; LEONE, A. Evaluation of Ecosystem Services related to Bio-Energy Landscape Connectivity (BELC) for land use decision making across different planning scales. **Ecol. Indic.** v. 61, p. 114–129, 2016. DOI:10.1016/j.ecolind.2015.01.016.

PELOROSSO, R.; GOBATTONI, F.; MENCONI, M.E.; VIZZARI, M.; GROHMANN, D.; RIPA, M.; LEONE, A. Landscape development scenario analysis by PANDORA model: An application in Umbria Region (Italy). *In Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering*, Valencia: CIGR-AgEng2012; p. 1–6, 2012.

PEREIRA, E.B., MARTINS, F.R., GONÇALVES, A.R., COSTA, R.S., LIMA, F.J.L.L., Rüter, R., ABREU, S.L., TIEPOLO, G.M., PEREIRA, S.V. SOUZA, J.G. **Atlas brasileiro de energia solar** 2.ed. São José dos Campos : INPE, 2017. 80p.: il. DOI:10.34024/978851700089.

PREFEITURA MUNICIPAL DE JUIZ DE FORA. **Cidade ganha novo Parque Municipal**. 2021. Disponível em: <<https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=71105>>. Acesso em: 12 abr 2022.

PRIMACK, R.B. **Essentials of conservation biology**. 6th edition. Sunderland: Sinauer Associates, 2014.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 9. ed. 3. reimp. São Paulo: Nobel, 1990. 549 p. il.

PRIMAVESI, A.M. **A Manual do solo vivo**. Editora Expressão Popular. 2ª. Edição. 2016. 206 p.

PROJETO MAPBIOMAS. **Análise de acurácia**. 2021a. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/estatistica-de-acuracia/colecao-5-0/>>. Acesso em: 24 jan 2021.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. 2021b. Disponível em: <<https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-download-mosaics.js>>. Acesso em: 10 jan. 2021.

PRUSKI, F.F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. *In*: PRUSKI, F.F., ed. **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2009. p.41-74.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System - Versão 2.16** (Nødebo); Open Source Geospatial Foundation Project; OSGeo: Chicago, IL, USA, 2016. <http://qgis.osgeo.org>, 2016.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System - Versão 3.16** (Hannover); Open Source Geospatial Foundation Project; OSGeo: Chicago, IL, USA, 2021. <http://qgis.osgeo.org>, 2021.

RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara-GO**. 242 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

RAHMATALLAH, Y., EMMERT-STREIB, F.; GLAZKO, G. Gene Sets Net Correlations Analysis (GSNCA): A multivariate differential coexpression test for gene sets. **Bioinformatics**, v. 30, n. 3, p.360–68, 2014.

RINK, D. & SCHMIDT, C. Afforestation of Urban Brownfields as a Nature-Based Solution. Experiences from a Project in Leipzig (Germany). **Land**. v.10, p.893, 2021. DOI:10.3390/land10090893.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Carlos Cesar Ronquim. 2.ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 34 p.: il. ; (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Territoria, ISSN 1806-3322; 35).

RUTLEDGE, D. Landscape indices as measures of the effects of fragmentation: can pattern reflect process?. **Department of Conservation**, Doc Science Internal Series, V. 98: 1-28, 2003.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em:

<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2022.

SCOLFORO, J.R.S. & CARVALHO, L.M.T. **Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Editora UFLA. Lavras: 2006. 288 p.

SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.; CARVALHO, L.M.T. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais** – Componentes geofísico e biótico. Lavras: Editora UFLA, 2008. 161 p.

SHAFFER, M.L. Minimum population sizes for species conservation. **BioScience** v. 31, p. 131–134, 1981.

SILVA, C.N.; SALIMENA, F. & CARVALHO, F. A.; MENINI NETO, L.; RIBEIRO, J.; FONSECA, C.; MOREIRA, B.; VALENTE, A.; PIFANO, D. Flora fanerogâmica do Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. **Rodriguesia**, v. 71, p. 1-11. 2020. DOI:10.1590/2175-7860202071075.

SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2021. Disponível em: <idesisema.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2021.

SOULÉ, M.E. What is conservation biology? **BioScience**, v. 35, p. 727–734, 1985.

STEWART, I. Networking opportunity. **Nature**, v. 427, p 601-604, 2004.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952. DOI:10.1130 / 0016-7606 (1952) 63 [1117: HAAOET] 2.0.CO; 2.

TAYLOR, P.D.; FAHRIG, L.; HENEIN K.; MERRIAM, G. Connectivity is a vital element of landscape structure. **Oikos**, v. 68, p.571–573, 1993. DOI: 10.2307/3544927.

TEIXEIRA, A., MATIAS, L., NOAL, R. MORETTI, E. **Qual a melhor definição de SIG?** Fator GIS, Curitiba: Sagres, v. 3, n. 11, p. 20-24, 1995.

TRAAG, V.A., WALTMAN, L. & VAN ECK, N.J. From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. **Sci Rep**, v.9, p.5233, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-41695-z.

UFV; CETEC; UFLA; FEAM. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2010. Disponível em: <<http://feam.br/-qualidade-do-solo-e-areas-contaminadas/mapa-de-solos>>. Acesso em: 21 jan. 2021.

UROY, L.; ERNOULT, A. & MONY, C. Effect of landscape connectivity on plant communities: a review of response patterns. **Landscape Ecology**, v. 34, p.203–225, 2019. DOI:10.1007/s10980-019-00771-5.

VIANA, C. S. **Caracterização dos processos erosivos no município de Belo Horizonte**: uma contribuição à gestão ambiental e ao planejamento urbano. 2000. 217

p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

WANGHE, K.; GUO, X.; LUAN, X.; LI, K. Assessment of Urban Green Space Based on Bio-Energy Landscape Connectivity: A Case Study on Tongzhou District in Beijing, China. **Sustainability**, MDPI, v.11, n.18, p 1-15, 2019.

WANGHE, K., GUO, X., WANG, M., ZHUANG, H., AHMAD, S., KHAN, T.U. XIAO, Y., LUAN, X., Li, K. Gravity model toolbox: An automated and open-source ArcGIS tool to build and prioritize ecological corridors in urban landscapes. **Global Ecology and Conservation**, v.22, e01012, 2020. DOI:10.1016/j.gecco.2020.e01012.

WILCOVE, D.S.; MCLELLAN, C.H.; DOBSON, A.P. Habitat fragmentation in the temperate zone. *In*: Soulé, M. E. (ed.). **Conservation Biology the Science of Scarcity and Diversity**. Sunderland: Sinauer Associates Inc., 1986. p. 237-256.

WU, J.G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. **Landscape Ecol**, v. 28, n. 6, p.999–1023, 2013.

WU, J. & HOBBS, R. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. **Landscape ecology**, v.17, p.355-365, 2002.

ZHANG, Z., MEEROW, S., NEWELL, J.P., LINDQUIST, M. Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design **Urban For. Urban Green.**, v.38, p. 305-317, 2019. DOI:10.1016/j.ufug.2018.10.014.

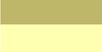
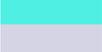
ZOLLNER, P.A.; LIMA, S.L.; Search strategies for landscape-level interpatch movements. **Ecology**, v.80, n.3, p. 1019-1030, 1999. DOI: 10.1890/0012-9658(1999)080[1019:SSFLLI]2.0.CO;2.

ANEXO A – Tabela de índices BTC aplicado às classes de uso e cobertura do solo de 3º nível categórico do CORINE Land Cover, adaptado às em zonas tropicais

1º nível	Índice BTC (Mcal/m ² /ano)	2º nível	Índice BTC (Mcal/m ² /ano)	3º nível	Índice BTC (Mcal/m ² /ano)
1 Superfícies artificiais	0	1.1 Áreas residenciais	0	111 Infraestrutura Urbana - Ocupação Densa	0
				112 Infraestrutura Urbana - Ocupação Dispersa	0,4
		1.2 Unidades industriais, comerciais e unidades de transporte	0	121 Unidades Industriais ou Comerciais e Instalações Públicas	0
		1.3 Mina, despejo e locais de construção	0	131 Mineração	0
2 Áreas agrícolas	1,3	2.3 Pastagens	1	231 Pastagem	1
		2.4 Áreas agrícolas heterogêneas	1,6	242 Mosaico de Agricultura e Pastagem	1,8
				244 Floresta Plantada	6,4
3 Florestas e áreas seminaturais	2,6	3.1 Florestas	5,5	311 Formação Florestal	12,8
		3.2 Associações de vegetação arbustiva e/ou herbácea	1,9	324 Formação Savânica	2,8
		3.3 Espaços abertos com pouca ou nenhuma vegetação	0,3	332 Afloramento Rochoso	0
5 Corpos D'água	0,1	5.1 Águas interiores	0,1	511 Rio	0,3
				512 Lago	0

Fonte: Adaptado de Pelorosso *et al.* (2021); Ingegnoli (2015) e Gobattoni *et al.*(2011).

**ANEXO B - Códigos das classes da legenda e paleta de cores utilizadas na
Coleção 5 do Projeto MapBiomias.**

COLEÇÃO 5		ID	Hexadecimal code	COLOR
1. Floresta	1. Forest	1	129912	
1.1. Floresta Natural	1.1. Natural Forest	2	1F4423	
1.1.1. Formação Florestal	1.1.1. Forest Formation	3	006400	
1.1.2. Formação Savânica	1.1.2. Savanna Formation	4	32CD32	
1.1.3. Mangue	1.1.3. Mangrove	5	687537	
1.2. Floresta Plantada	1.2. Forest Plantation	9	935132	
2. Formação Natural não Florestal	2. Non Forest Natural Formation	10	BBFCAC	
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	2.1. Wetland	11	45C2A5	
2.2. Formação Campestre	2.2. Grassland	12	B8AF4F	
2.3. Apicum	2.3. Salt Flat	32	968c46	
2.4. Afloramento Rochoso	2.4. Rocky Outcrop	29	#FF8C00	
2.5. Outras Formações não Florestais	2.5. Other non Forest Formations	13	BDB76B	
3. Agropecuária	3. Farming	14	FFFFB2	
3.1. Pastagem	3.1. Pasture	15	FFD966	
3.2. Agricultura	3.2. Agriculture	18	E974ED	
3.2.1. Lavoura Temporária	3.2.1. Temporary Crop	19	D5A6BD	
3.2.1.1. Soja	3.2.1.1. Soy bean	39	c59ff4	
3.2.1.2. Cana	3.2.1.2. Sugar Cane	20	C27BA0	
3.2.1.3. Outras Lavouras Temporárias	3.2.1.3. Other Temporary Crops	41	e787f8	
3.2.2. Lavoura Perene	3.2.2. Perennial Crop	36	f3b4f1	
3.3 Mosaico de Agricultura e Pastagem	3.3. Mosaic of Agriculture and Pasture	21	fff3bf	
4. Área não Vegetada	4. Non vegetated area	22	EA9999	
4.1. Praia e Duna	4.1. Beach and Dune	23	DD7E6B	
4.2. Infraestrutura Urbana	4.2. Urban Infrastructure	24	aa0000	
4.3. Mineração	4.3. Mining	30	af2a2a	
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	4.4. Other Non Vegetated Areas	25	FF99FF	
5. Corpos D'água	5. Water	26	0000FF	
5.1. Rio, Lago e Oceano	5.1. River, Lake and Ocean	33	0000FF	
5.2. Aquicultura	5.2. Aquaculture	31	29EEE4	
6. Não Observado	6. Non Observed	27	D5D5E5	

Fonte: Projeto MapBiomias (2021b)

ANEXO C – Códigos das classes da legenda utilizados no CORINE Land Cover.

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
1. ARTIFICIAL SURFACES	1.1. Urban fabric 1.2. Industrial, commercial and transport units 1.3. Mine, dump and construction sites 1.4. Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.1.1. Continuous urban fabric 1.1.2. Discontinuous urban fabric 1.2.1. Industrial or commercial units 1.2.2. Road and rail networks and associated land 1.2.3. Port areas 1.2.4. Airports 1.3.1. Mineral extraction sites 1.3.2. Dump sites 1.3.3. Construction sites 1.4.1. Green urban areas 1.4.2. Sport and leisure facilities
2. AGRICULTURAL AREAS	2.1. Arable land 2.2. Permanent crops 2.3. Pastures 2.4. Heterogeneous agricultural areas	2.1.1. Non-irrigated arable land 2.1.2. Permanently irrigated land 2.1.3. Rice fields 2.2.1. Vineyards 2.2.2. Fruit trees and berry plantations 2.2.3. Olive groves 2.3.1. Pastures 2.4.1. Annual crops associated with permanent crops 2.4.2. Complex cultivation patterns 2.4.3. Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation 2.4.4. Agro-forestry areas
3. FOREST AND SEMI-NATURAL AREAS	3.1. Forests 3.2. Scrub and/or herbaceous associations 3.3. Open spaces with little or no vegetation	3.1.1. Broad-leaved forest 3.1.2. Coniferous forest 3.1.3. Mixed forest 3.2.1. Natural grassland 3.2.2. Moors and heathland 3.2.3. Sclerophyllous vegetation 3.2.4. Transitional woodland-scrub 3.3.1. Beaches, dunes, sands 3.3.2. Bare rocks 3.3.3. Sparsely vegetated areas 3.3.4. Burnt areas 3.3.5. Glaciers and perpetual snow
4. WETLANDS	4.1. Inland wetlands 4.2. Marine wetlands	4.1.1. Inland marshes 4.1.2. Peat bogs 4.2.1. Salt marshes 4.2.2. Salines 4.2.3. Intertidal flats
5. WATER BODIES	5.1. Inland waters 5.2. Marine waters	5.1.1. Water courses 5.1.2. Water bodies 5.2.1. Coastal lagoons 5.2.2. Estuaries 5.2.3. Sea and ocean

Fonte: Büttner *et al.* (2012)

ANEXO D – Caracterização das BELUs definidas em Juiz de Fora

BELU	Nome	Área (ha)	Perímetro (m)
1	FILGUEIRAS RURAL	144,40	9.648,86
2	MATA DO PROGRESSO	3,21	1.166,90
3	PARQUE ESTADUAL MATA DO KRAMBECK	331,77	9.429,06
4	PAULA LIMA	3.158,03	35.296,02
5	FAZENDINHAS GOIABAL	47,86	6.364,74
6	ARCELORMITTAL	623,90	20.605,68
7	USINA HIDRELÉTRICA PICADA	1.097,63	22.016,10
8	CORUPATI	1.720,09	28.601,45
9	FAZENDINHAS PRAINHA DE MONTE VERDE	51,53	5.009,63
10	JARDIM BOTÂNICO	82,76	4.644,78
11	PARQUE NATURAL MUNICIPAL DA LAJINHA	88,63	5.609,58
12	MATA DA FAEFID UFJF	16,46	4.198,60
13	GRAMINHA	875,85	25.079,38
14	AEROPORTO	342,21	24.936,57
15	RPPN LAVÍNICA	26,73	2.579,77
16	RESERVA BIOLÓGICA POÇO D'ANTA	291,49	11.225,90
17	MATA DO BOM JARDIM	5,25	1.742,19
18	SARANDIRA	13.163,48	81.875,92
19	RPPN NOVA GRAMADO	5,33	967,43
20	MATA DO BORBOLETA	18,60	4.004,41
21	MATA DO VALE DO IPÊ	33,64	5.361,56
22	MATA DO BOSQUE IMPERIAL	22,03	3.794,96
23	MONUMENTO NATURAL MORRO DO CRISTO	103,84	14.332,85
24	MATA DO DOM BOSCO	3,83	1.261,80
25	MATA DO CASCATINHA	4,98	1.558,79
26	MATA DA REITORIA UFJF	7,57	2.210,58
27	MATA DO SANTA LUZIA	11,19	2.875,17
28	MATA DO SÃO MATEUS	11,16	2.802,68
29	MATA DO TEIXEIRAS	6,15	1.592,11
30	MATA DO MARILÂNDIA	6,46	1.518,66
31	MATA DO VITORINO BRAGA	3,99	1.034,99
32	MATA DE LOURDES	5,00	1.118,85
33	HUMAITÁ	26.786,87	108.721,50
34	RESERVA BIOLÓGICA SANTA CÂNDIDA	116,28	4.741,22
35	MUSEU MARIANO PROCÓPIO	9,34	1.471,44
36	MATA DO CONDOMÍNIO JARDIM DA SERRA	13,40	3.499,42
37	MATA DO SÃO PEDRO	4,17	1.054,30
38	MATA DA CERVEJARIA BARBANTE	4,13	1.285,52
39	MATA DO CIDADE ALTA	7,15	2.047,11
40	MATA DA SANTA CASA	4,72	1.079,43
41	MONTE VERDE	2.741,79	46.115,71
42	PESQUEIRO RIO CLARO	216,94	7.874,35
43	ANGOLINHA	176,84	9.217,48
44	PIRES	2.424,81	29.398,27
45	FAZENDINHAS DE VALADARES	742,91	19.014,74
46	MATA DO RIBEIRÃO DO CARMO	2.067,26	27.820,81
47	PONTE DOS RODRIGUES	198,22	10.358,26
48	SÃO PEDRO ANGOLINHA	172,08	6.926,73
49	JACUTINGA	771,85	14.281,03

BELU	Nome	Área (ha)	Perímetro (m)
50	RPPN FAZENDA BOA VISTA	40,05	3.501,89
51	TORREÕES	66,01	3.943,67
52	PIRAPETINGA	11.619,88	75.730,61
53	RPPN SALVATERRA	410,46	10.044,08
54	SÃO FRANCISCO DE PAULA	52,13	7.838,52
55	FAZENDINHAS PEDRA BONITA	75,31	6.708,79
56	RANCHO CANABRAVA	728,15	19.279,65
57	ENTROCAMENTO	276,95	14.388,89
58	FAZENDA YUNG	37,52	9.506,86
59	RECANTO DOS LAGOS	110,83	16.018,92
60	GRAMA	219,95	17.431,93
61	COMENDADOR FIGUEIRAS	180,55	16.738,77
62	IGREJINHA	156,56	14.142,64
63	GRANJAS BETHEL	137,28	11.754,13
64	SALVATERRA	513,76	22.315,42
65	CENTRO URBANO	4.531,80	199.960,30
66	ROSÁRIO DE MINAS	31.365,62	127.877,14
67	BARREIRA DO TRIUNFO	329,65	25.689,24
68	RETIRO	206,37	15.115,85
69	NOVA SUIÇA	8.203,74	139.512,22
70	BENFICA	1.670,85	26.507,49
71	MILHO BRANCO	2.951,46	96.186,78
72	ALDEIA	18.817,85	151.645,32
73	REPRESA DR. JOÃO PENIDO	432,01	26.198,49
74	PROGRESSO	1.725,71	60.470,21

Fonte: Elaborado pela autora.