

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA ÁREA III
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA**

MARLÍSIA D'ABADIA DE PINA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE E TOMADA DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO DE
LOCAIS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA DE BIOMASSA COM CANA-
DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS**

Goiânia, GO
MARÇO / 2021

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

MARLÍSIA D'ABADIA DE PINA

**ANÁLISE E TOMADA DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO DE
LOCAIS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA DE BIOMASSA COM CANA-
DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Cartográfica e de
Agrimensura do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Édipo Henrique Cremon

Coorientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang

Goiânia, GO

MARÇO / 2021

P645a Pina, Marlísia D'Abadia de.

Análise e tomada de decisão para avaliação de locais de produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no Estado de Goiás / Marlísia D'Abadia de Pina. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
84f. ; il.

Orientador: Prof. Dr. Édipo Henrique Cremon.

Coorientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Coordenação de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Departamento Acadêmico da Área III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Sistema de informação geográfica. 2. Processo decisório. 3. Energia de biomassa. I. Cremon, Édipo Henrique (orientador). II. Zang, Joachim Werner (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 526

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Marlísia D'Abadia de Pina

Matrícula: 20161011190148

Título do Trabalho: Análise e tomada de decisão para avaliação de locais de produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no Estado de Goiás

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

A referida autora declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia – GO,
Local

17/03/2021.
Data

Marlísia D'Abadia de Pina

Marlísia D'Abadia de Pina



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

ATA Nº ECA 01 – TCC/2021.1

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 17 dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, às 9:00 horas, na sala virtual meet.google.com/tvi-wpgh-tjs, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso da Graduanda **Marlísia D' Abadia de Pina** (matrícula 20161011190148) do curso de Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, do Departamento III, Câmpus Goiânia, do Instituto Federal de Goiás, no primeiro semestre do ano de dois mil e vinte e um. A banca foi composta pelos seguintes membros:

- Édipo Henrique Cremon (Professor-Orientador)
- Joachim Werner Zang (Professor-Coorientador)
- Fábio Campos Macedo
- Hostílio Maia de Paula Neto

sob a presidência da(o) primeira(o). O Trabalho de Conclusão de Curso tem como título "**Análise e tomada de decisão para avaliação de locais de produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no estado de Goiás**", sob orientação do Prof. **Édipo Henrique Cremon** e coorientação do Prof. **Joachim Werner Zang**. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, tendo sido a autora arguida pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 9,2 (nove virgula dois).

Encerra-se a sessão às 11:45 horas e 00 minutos. Eu, Profa. Marina Alberti Macedo, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca Examinadora.

Profa. Marina Alberti Macedo (Assinado eletronicamente)

Prof. Édipo Henrique Cremon (Assinado eletronicamente)

Prof. Joachim Werner Zang (Assinado eletronicamente)

Prof. Fábio Campos Macedo (Assinado eletronicamente)

Prof. Hostílio Maia de Paula Neto (Assinado eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- Marina Alberti Macedo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 11:53:44.
- Joachim Werner Zang, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 11:50:06.
- Hostilio Maia de Paula Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 11:37:08.
- Fabio Campos Macedo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 11:36:56.
- Edipo Henrique Cremon, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2021 11:36:43.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/03/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 136151

Código de Autenticação: c68dfc7d79



“A inteligência aguda e sem grandeza tudo fura e nada move.”

Rabindranath Tagore,

1861-1941.

RESUMO

Título: Análise e tomada de decisão para avaliação de locais de produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no estado de Goiás

Autora: Marlísia D’Abadia de Pina

Orientador: Dr. Édipo Henrique Cremon

Coorientador: Dr. Joachim Werner Zang

A Agência Internacional de Energia aponta o Brasil como o país com maior potencial de produção de bioenergia, sendo a cana-de-açúcar uma fonte potencial de geração de energia por meio da biomassa e o estado de Goiás o segundo maior produtor desta gramínea da família das *Poaceae* no Brasil. Para otimizar a exploração deste recurso de biomassa para a produção de energia se faz necessário um sistema de apoio à decisão que aliado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) possa localizar áreas favoráveis para esta aplicação. O objetivo deste trabalho foi identificar locais para produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no estado de Goiás. Para isso, foi utilizado um sistema de suporte à decisão apoiado em SIG com o uso de critérios favoráveis e restritivos relacionados às categorias técnica, econômica e ambiental. Após listar os fatores favoráveis e os fatores desfavoráveis, foi aplicada a lógica *fuzzy* e por álgebra de mapas os dados foram cruzados apontando as áreas propícias para geração de energia da biomassa de cana-de-açúcar. Os resultados apontaram que o estado de Goiás possui uma área apta a produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar de 49001 km^2 , isto corresponde a uma proporção de $4,65 \times 10^7$ toneladas de cana-de-açúcar, com seus resíduos seria possível gerar $8,81 \times 10^{13} \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ de biogás (mais que a quantidade atualmente produzida no Brasil) e originar $5,68 \times 10^{14} \text{ kWh}$ de energia elétrica.

Palavras-chave: Energias renováveis, SIG, lógica *fuzzy*, álgebra de mapas.

ABSTRACT

Title: *Analysis and decision making for the evaluation of biomass energy production sites with sugarcane in the state of Goiás (Brazil)*

Author: *Marlísia D'Abadia de Pina*

Advisor: *Dr. Édipo Henrique Cremon*

Co-advisor: *Dr. Joachim Werner Zang*

The International Energy Agency indicates Brazil as the country with the greatest potential for bioenergy production, with sugarcane being a potential source of energy generation through biomass and the state of Goiás as the second largest producer of this grassy of Poaceae family in Brazil. In order to optimize the exploitation of this biomass resource for energy production, it is necessary to have a decision support system that, together with a Geographic Information System (GIS), can locate favorable areas for this application. The aim of this work was to identify sites for biomass energy production with sugarcane in the state of Goiás. Therefore, a decision support system by GIS was taken with the use of favorable and restrictive criteria related to technical, economic and environmental categories. Hence, after listing the favorable and unfavorable factors, fuzzy logic was applied and by the algebra of maps the data was crossed pointing out the areas suitable for energy generation from sugarcane biomass. The results have depicted that the state of Goiás has a suitable area for the production of biomass energy with sugarcane of 49001 km², this corresponds to a proportion of 4.65×10^7 tons of sugarcane, with its residues it would be possible to generate 8.81×10^{13} Nm³•ano⁻¹ of biogas (more than the amount currently produced in Brazil) and generate 5.68×10^{14} kWh of electricity.

Keywords: *Renewable energy, GIS, fuzzy logic, map algebra.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da região de estudo	29
Figura 2 - Fluxograma metodológico central deste trabalho	31
Figura 3 – Localização dos pontos vetoriais referentes a usinas de cana-de-açúcar	41
Figura 4 – Localização das usinas de biogás instaladas em Goiás para produção de energia..	42
Figura 5 – Representação gráfica da variável restritiva “Área produtiva” do fator criterial terras de agricultura e silvicultura	44
Figura 6 – Representação gráfica da variável restritiva “Área protegida” do fator criterial unidades de conservação, comunidades quilombolas e terras indígenas.....	45
Figura 7 – Representação gráfica da variável restritiva “Área urbana” do fator criterial perímetros urbanos	46
Figura 8 – Representação gráfica da variável restritiva “Corpos d’água” do fator criterial rede hidrográfica.....	47
Figura 9 – Representação gráfica da variável restritiva “Rodoferroviária” do fator criterial trechos rodoviários e ferroviários	48
Figura 10 – Representação gráfica da variável restritiva “Declividade” do fator criterial declividades	49
Figura 11 – Representação gráfica da variável favorável “Cana-de-açúcar” do fator criterial referente às áreas produtivas de cana-de-açúcar do estado de Goiás. O valor 0 (zero) indica a ausência e 1(um) a presença de cana-de-açúcar com base nos dados do MapBiomas para o ano de 2019	50
Figura 12 – Representação gráfica da variável favorável “Trecho de energia” do fator criterial trechos de energia	51
Figura 13 – Representação gráfica da variável restritiva “Biocombustível” do fator criterial produção de biocombustível.....	52
Figura 14 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Área produtiva”.....	54
Figura 15 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Área protegida”	55
Figura 16 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Área urbana”	56
Figura 17 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Corpos d’água”	57

Figura 18 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Rodoferroviária”	58
Figura 19 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Declividade”	59
Figura 20 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Cana-de-açúcar”.....	61
Figura 21 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Trecho de energia”.....	62
Figura 22 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Biocombustível”	63
Figura 23 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Transporte”	64
Figura 24 – Camada matricial de restrição final da operação <i>AND</i>	66
Figura 25 – Camada matricial resultado do AHP	67
Figura 26 – Camada matricial resultado da operação <i>AND</i> entre as camadas favoráveis de distância “Cana-de-açúcar” e “Transporte”.....	68
Figura 27 – Camada matricial final, resultado da multiplicação da camada <i>AND fuzzy</i> pela camada resultado do AHP	69
Figura 28 – Mapa de adequabilidade das urbes melhor qualificadas para a instalação de usinas de biomassa.....	71
Figura 29 – Comparação visual entre os locais potenciais à instalação de usinas de biomassa e localidades onde estão instaladas usinas de cana-de-açúcar	73
Figura 30 – Comparação visual entre os locais potenciais à instalação de usinas de biomassa e localidades onde estão instaladas usinas de biogás com sua aplicação para energia elétrica...	74
Figura 31 – Comparação visual entre as áreas melhor qualificadas e usinas produtoras de biogás.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Base métrica para zona tampão das variáveis preditivas.....	36
Tabela 2 – Coeficientes de significância de peso por variável de fatores criteriosais	40
Tabela 3 – Cidades classificadas com pontuação nível 0,8 – 1	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CLP	Combinação Linear Ponderada
CP	<i>Compromise Programming</i>
CSV	<i>Comma Separated Value</i>
CTF	Cadastro Técnico Federal
EEG	<i>Erneuerbaren-Energien-Gesetzes</i>
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
EWT	<i>Energy Wood Terminal</i>
FAHP	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>
FANP	<i>Fuzzy Analytic Network process</i>
GNV	Gás Natural Veicular
GN	Gás Natural
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPM	<i>Ideal Point Method</i>
MAM	Métodos de Análise Multicritério
MAUT	<i>Multiattribute Utility Theory</i>
MCA	<i>Multi-Criteria Assessment</i>
MCE	<i>Multi-Criteria Evaluation</i>
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MW	<i>Megawatt</i>
OWA	<i>Ordered Weighted Average</i>
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SADE	Sistema de Apoio à Decisão Espacial
SIG	Sistema de Informações Geográficas
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RTPA	<i>Real-Time Process Algebra</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
WLS	<i>Weighted Least Summation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Compostos químicos

CH₄

Símbolos

g•m⁻²

°C

GW

kg

kg•ha⁻¹

ha

km

kWh•m⁻³

L

m³

Nm³

Nm³•ano⁻¹

Nm³•L⁻¹

Nm³•t⁻¹

t

%

t•ha⁻¹

Elementos químicos

Metano

Unidades de medida

Gramas por Metro Quadrado

Grau Celsius ou Centígrado

Gigawatt

Quilograma

Quilograma por Hectare

Hectare

Quilômetro

Quilowatt-hora por Metro Cúbico

Litro

Metro Cúbico

Normal Metro Cúbico

Normal Metro Cúbico por Ano

Normal Metro Cúbico por Litro

Normal Metro Cúbico por Tonelada

Tonelada

Por Cento

Tonelada por Hectare

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1	Análise e tomada de decisão	19
3.2	Energia de biomassa da cana-de-açúcar	20
3.3	Análise multicritério e SIG	21
4	METODOLOGIA.....	28
4.1	Localização e caracterização da área de estudo	28
4.2	Procedimentos metodológicos.....	30
4.2.1	Critérios e fatores.....	31
4.2.2	Variáveis preditivas	33
4.2.3	Coleta de dados.....	33
4.2.4	Manipulação dos dados	34
4.2.5	Geração do mapa preditivo final	39
4.2.6	Validação dos resultados	40
5	RESULTADOS	43
5.1	Camadas de entrada das variáveis.....	43
5.1.1	Camadas restritivas.....	43
5.1.2	Camadas favoráveis.....	50
5.2	Camadas <i>fuzzy</i> das variáveis.....	53
5.2.1	Camadas restritivas.....	53
5.2.2	Camadas favoráveis.....	60
5.3	Camadas finais	65
5.4	Potencial de biogás.....	70
5.5	Validação	72

6	DISCUSSÕES	76
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Grande parte da humanidade depende de fontes de energia não renováveis com enfático potencial polutivo, que produzem energia, mas geram degradação ambiental e riscos em seu procedimento de transformação, além de serem fontes de ímprobo acesso, como petróleo, carvão e urânio. Entretanto, não se pode simplesmente parar de obter a energia, pois ela é o nutrimento para todas as máquinas em nosso contexto de sobrevivência e também nos possibilita avanço tecnológico e social. O que é necessário, então, é uma mudança na maneira como a energia é lograda. Uma boa solução é usar fontes de energias renováveis, uma delas é a biomassa, sendo as outras, luz solar, ventos, água, marés e calor da Terra.

Fontes renováveis de energia são resultantes de recursos naturais com ciclo de renovação em escala de tempo de vida humana, estão a dispor para aproveitamento e não se extenuam. Neste âmbito pode-se afirmar que as fontes de energia renováveis devem desempenhar um papel muito importante na produção de energia nos próximos anos.

Biomassa é o termo usado para definir o material de origem biológica utilizado na produção de energia a partir da transformação de resíduos de organismos vivos. Ela é constituída de substâncias de origem orgânica e a energia pode ser obtida, por exemplo, por meio da combustão ou digestão anaeróbica da lenha, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos florestais, resíduos agrícolas, casca de arroz, excrementos de animais, entre outros (MBANZE *et al.*, 2018). São os principais produtos derivados da biomassa: o carvão vegetal, a lenha, o óleo vegetal, o etanol, o etanol celulósico, o biodiesel e o biogás.

Pode-se destacar três caminhos para que se tenha como fonte energética a biomassa: o primeiro é pelo método de combustão direta; o segundo é por meio da pirólise e gaseificação; e o terceiro é pela reprodução do processo natural (BRASIL, 2008), gerando uma mistura de gases (biogás) provenientes de processos biológicos devido à decomposição de matéria orgânica em meio anaeróbio, via ação de micro-organismos (FNR, 2010). Na geração de energia do biogás, acontece a conversão da energia química do gás em energia mecânica mediante um processo controlado de combustão, essa energia ativa um gerador que produz energia elétrica. O biogás também é usado em caldeiras por intermédio de sua queima direta para a cogeração de energia (MEZZEDIMI, 2017). Para geração de energia que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil, complementando os caminhos de aproveitamento energético da biomassa, pode-se citar a aplicação do biodiesel que serve como substituto ao óleo diesel para uso em motores à combustão interna com ignição por

compressão (BRASIL, 2005), uma fonte de obtenção do óleo diesel ou biogás é a cana-de-açúcar.

A gramínea cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma fonte de energia renovável, podendo ser utilizada para produção de biogás proveniente da biodigestão dos resíduos processados para a geração de açúcar e álcool, como vinhaça e torta de filtro; fazendo o aproveitamento destes resíduos pode-se diminuir o “*carbon footprint*” (pegada do carbono) da produção de etanol (ZANG; MARTINS; FONSECA-ZANG; 2018).

A tecnologia de geração de biogás está sendo utilizada em grande escala para aproveitar resíduos orgânicos produzindo energia, fertilizantes e combustíveis. Por exemplo, na Alemanha, há mais de 9300 usinas de biogás com uma capacidade elétrica instalada de 5 GW (FACHVERBAND BIOGAS, 2020). Não importando a maneira de utilização do biogás ter-se-á como resultado ao menos uma forma de energia (elétrica, térmica ou mecânica), assim proporcionando uma poupança de recursos, com um importante valor econômico associado, o que gera renda e economia, despertando um crescente interesse por esta tecnologia (OLIVEIRA, 2009).

É evidente que, para a otimização da exploração desse recurso para produção de energia, é necessário um Sistema de Apoio à Decisão (SAD). Esse sistema deve levar em consideração os fatores técnicos, econômicos e ambientais que afetam a instalação, fornecendo aos gestores a solução ideal que os ajudará a determinar o melhor local para a implantação de uma usina de produção de energia de biomassa.

SADs são sistemas pautados em nível gerencial computacional. Combinam dados e modelos analíticos sofisticados com uma interface amigável para apoiar a tomada de decisão (NAKAGAWA, 2016). Sob esse escopo, Sistema de Apoio à Decisão Espacial (SADE), baseado na combinação de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), possibilita a análise e tomada de decisão para avaliação exploratória de locais favoráveis à produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar, permitindo assim, a identificação de regiões onde potencialmente um biodigestor poderia ser instalado para maximizar o seu uso e minimizar o impacto ambiental e os custos de instalação.

Estudos realizados pela Agência Internacional de Energia (IEA) e pela Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás) apontam o Brasil como a nação com a maior potencialidade de produção bioenergética (SNA, 2019; CIBIOGÁS, 2020). O equipotencial geral de energia entre o biogás e a energia elétrica é de $6,5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ e a conversão do biogás em eletricidade fazendo uso de grupo geradores (motor de combustão interna) tem um rendimento entre 30 e 38%, ou seja, $2,0 - 2,5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ (OLIVEIRA, 2009). A capacidade

energética do biogás depende da concentração de metano (50% - 80%), sendo assim, seu poder calorífico pode variar entre 4,95 e 7,92 kWh•m⁻³, efetuando a purificação da mistura gasosa (eliminando água e dióxido de carbono) este valor chega a 9,9 kWh•m⁻³ (COLDEBELLA *et al.*, 2006). Considerando os resíduos das indústrias do setor sucroenergético e de alimentos, bem como do saneamento, poderiam ser gerados 84,6 bilhões de m³ por ano de biogás (CIBIOGÁS, 2020), com o potencial de ocasionar acima de 200 bilhões de kWh por ano de energia elétrica. Assim, visto que atualmente a capacidade instalada é de 1.35×10^9 Nm³•ano⁻¹ (CIBIOGÁS, 2020), a aptidão de geração de energia poderia facilmente ser aumentada aproveitando os resíduos orgânicos disponíveis.

No Brasil, a cana-de-açúcar tem potencial para se tornar a principal fonte de geração de energia por meio da biomassa, a cada tonelada do produto, 250 quilogramas são de bagaço e outros 204 quilogramas de palhas e pontas que podem ser aproveitados para geração de energia (TORQUATO; RAMOS, 2013). Em 2019, a quantidade produzida de cana-de-açúcar no Brasil foi de 752.895.389 toneladas, destas 75.315.239 foram produzidas em Goiás, configurando o estado como o segundo maior produtor na classificação ordenada da Federação (PAM, 2019).

O biodigestor anaeróbico é um sistema destinado à produção de biogás e em seu processo preserva solos e rios além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa. É uma fonte distribuída de energia e representa uma mina competitiva para redução de importações de energéticos fósseis e de emissões. Seria então, uma ótima opção para o aproveitamento da biomassa existente na produção de energia renovável (MILANEZ *et al.*, 2018). Em um país gerador de tanta matéria-prima, fonte para a produção deste tipo de energia, é essencial à análise e tomada de decisão para avaliação de locais onde seria mais viável a implantação deste tipo de tecnologia; essa investigação pode ser gerada por meio de um SIG. Este estudo parte da hipótese de que a integração de dados geoespaciais ambientais e de infraestrutura possibilitem a identificação de áreas aptas para a produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar. Nesse sentido, a elaboração deste trabalho de conclusão de curso é baseada em obras bibliográficas e experimentos, adotando o método hipotético-dedutivo, buscando favorecer um método de análise e tomada de decisão para avaliação de locais favoráveis a produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no estado de Goiás.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em identificar locais favoráveis para a produção de energia de biomassa com cana-de-açúcar no estado de Goiás com base na análise e tomada de decisão com o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Para isso, os objetivos específicos são:

- Analisar os dados de produção de cana-de-açúcar no estado de Goiás por município;
- Identificar fatores criteriosos que afetem a instalação de uma planta de produção de energia de biomassa de cana-de-açúcar;
- Verificar por meio de revisão de literatura qual metodologia existente que aplicada na forma de um SADE combinado a um SIG teria potencial de facilitar a análise e tomada de decisão para avaliação de locais de produção de energia de biomassa;
- Estimar o potencial de produção de biogás para os locais mais favoráveis à sua produção.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os seguintes temas: análise e tomada de decisão; energia de biomassa da cana-de-açúcar; análise multicritério e SIG.

3.1 Análise e tomada de decisão

Define-se análise por “caminho que permite transitar de um composto aos seus ingredientes e dos movimentos às forças que o produziram; do efeito às causas e das causas particulares às gerais, estendendo-se o percurso até que o raciocínio termine nas mais gerais” (HOUAISS, 1998). Posto isto, pode-se concluir que se trata de avaliar um objeto ou algo de maneira detalhada, interpretando cada uma de suas partes, pretendendo obter uma visão do todo. Logo, o ato de analisar é um processo fundamental na tomada de decisão.

Tomada de decisão é uma ação continuada relativa ao processo mental de percepção que resulta na escolha de uma opção entre várias, sendo amplamente praticada quando o ato decisório inclui preferência, inferência, classificação e julgamento (WANG; LIU; RUHE, 2004).

Para Chiavenato (2003), toda tomada de decisão envolve seis elementos:

1. O tomador de decisão – pessoa que faz uma escolha entre várias alternativas futuras de ação;
2. Os objetivos – aqueles que o tomador de decisão pretende alcançar com suas ações;
3. As preferências – critérios que o tomador de decisão usa para fazer sua escolha.
4. A estratégia – caminho da ação que o tomador de decisão escolhe para alcançar seus objetivos dependendo dos recursos que pode dispor;
5. A situação – aspectos do ambiente que envolve o tomador de decisão (alguns fora de seu controle, conhecimento ou compreensão) e que afetam sua escolha;
6. O resultado – consequência ou resultado de uma estratégia.

Sendo composta de sete etapas que guiam todo o processo:

1. Percepção da situação que envolve qualquer problema;
2. Análise e definições acerca do problema;
3. Definição de objetivos;
4. Procura de alternativas de solução ou de curso de ação;

5. Comparação e avaliação das alternativas;
6. Escolha da alternativa mais apropriada para atingir os objetivos;
7. Efetivação da alternativa escolhida.

Conlisk (1996) percebeu que em processos complexos de tomada de decisão os agentes tomadores de decisão falham por não ter um conhecimento estatístico dominante, erram ao atualizar probabilidades com base em nova informação ou mesmo ignoram informação relevante, não possuindo um comportamento racional maximizador. Então concluiu que as regularidades que são observadas, relativas ao padrão de tomada de decisão, não podem ser compreendidas utilizando apenas a razão por si só, mas sim a partir de alguma heurística adotada. Desta maneira a racionalidade deve ser de alguma forma modelada como adaptação dinâmica, surge então a necessidade do uso de modelos computacionais para análise do processo de tomada de decisões. O processo cognitivo de tomada de decisão pode perfeitamente ser modelado como uma sequência de seleções cartesianas baseadas em produtos (WANG; LIU; RUHE, 2004) consequentemente surge o processo de decisão baseado em álgebra (*Real-Time Process Algebra - RTPA*). A partir disto sistemas pautados a nível gerencial computacional foram cada vez mais implementados, ganhando espaço no processo de tomada de decisão. A Álgebra de Mapas, por exemplo, é um processo recorrente quando se tange à área de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, pois se refere a um conjunto de operadores que manipulam campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno) (BARBOSA, 1997).

3.2 Energia de biomassa da cana-de-açúcar

Benke (1993) define que “biomassa é uma medida de quanta massa de tecido vivo para uma população está presente em um instante no tempo, e suas unidades são massa (ou energia) por unidade de área (por exemplo, $g \cdot m^{-2}$)”; podem ser utilizadas para fins energéticos por meio da decomposição de uma variedade de recursos renováveis (RSU; resíduos agrícolas; excrementos; madeira; restos de alimentos; plantas; resíduos de animais).

A cana-de-açúcar se encaixa como recurso de energia renovável, o bagaço e a palha desta gramínea são matérias-primas de destaque como fontes energéticas. Uma tonelada de *Saccharum officinarum* L. contém energia equivalente a 1,2 barris de petróleo, sendo que um terço dessa energia está armazenada quimicamente no caldo (açúcares) e o restante na sua biomassa (metade no bagaço e metade na palha) (GOES, 2008). Sendo assim, o bagaço e a palha da cana-de-açúcar podem ser utilizados na geração de excedentes de energia elétrica

para ser comercializada. Nesse contexto, o aproveitamento da biomassa surge como fonte privilegiada, destacando-se o biogás, pois a sua produção faz parte do ciclo global do carbono (MILANEZ, 2018).

Os sistemas de recuperação de biogás exploram processos bioquímicos, provenientes de matéria orgânica em meio anaeróbico, para decompor a biomassa, assim, o metano liberado pode ser usado como fonte de energia ao invés de ir para a natureza, poluindo o solo e a atmosfera. Esses processos bioquímicos, em meio de biodegradação natural, liberam anualmente entre 590 e 800 milhões de toneladas de metano na atmosfera (MILANEZ, 2018).

O biogás atua como mecanismo regulador da intermitência das fontes eólica e fotovoltaica, diferencia-se da energia eólica ou solar por ser gerado de forma contínua e poder ser estocado a baixo custo, seja na forma de matéria-prima, seja como gás comprimido. Torna-se um fator de segurança energética quando derivado de atividades agropecuárias, visto que diminui as dificuldades de atendimento da demanda por energia elétrica em áreas distantes no meio rural. Demonstrações de cálculos de custos (incluindo-se os relacionados a impostos e perdas com transmissão e distribuição) apontam que o biogás gerado na produção agropecuária de maneira não centralizada, por biodigestores, pode se tornar mais vantajoso (devido ao menor custo) do que a energia adquirida pelo usuário do campo na rede pública (MILANEZ, 2018).

3.3 Análise multicritério e SIG

Um SIG é uma coleção de ferramentas computacionais abrangendo *hardware*, *software*, banco de dados e informação espacial (FITZ, 2008). Tais ferramentas se integram por meio de procedimentos computacionais e recursos humanos; mediante técnicas que associam os dados permitindo e facilitando a análise, a gestão ou a representação do espaço e dos fenômenos que nele ocorrem; visam maior facilidade, segurança e agilidade nas atividades humanas referentes ao monitoramento, planejamento e tomada de decisão relativa ao espaço geográfico. Posto isto, pode fornecer informações aos tomadores de decisão, neste caso, o foco desse sistema é, principalmente, a eficiência operacional. O processo de tomada de decisão é a essência da administração, e consiste na busca e no caminho a ser perseguido e que seja viável, propiciando o melhor resultado final. Câmara, Davis e Monteiro (2001) enfatizaram que se o local é importante para o negócio, logo o Geoprocessamento é a ferramenta de trabalho.

Cada vez que a tomada de decisão tem que considerar inúmeras variáveis a sentença se torna mais difícil e complexa, demandando uma avaliação de critérios, geralmente, representando atributos espaciais. Desta maneira, para suporte à tomada de decisão, têm surgido a partir da década de 1960, os Métodos de Análise Multicritério (MAM) (MEDEIROS, 2013).

Os MAMs se diferenciam pela maneira como os critérios e sub-critérios são categorizados ou hierarquizados, de modo a permitir o uso conjugado de vários métodos. A maioria desses procedimentos utiliza-se de modelagem matemática para harmonizar o processo de tomada de decisão, fazendo comparação entre alternativas ou cenários, com circunspeção, apontando soluções que tenham adequabilidade aos tomadores de decisão (SILVA; BELDERRAIN, 2005). Dentre os métodos existentes, os que mais se destacam são: o *Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE); o Método Combinação Linear Ponderada (CLP); o Média Ponderada Ordenada (MPO); a Agregação pelo Operador (*Ordered Weighted Averaging - OWA*); o *Elimination and Choice Translating Algorithm* (ELECTRE); o Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process - AHP*), sendo este último o mais conhecido (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005).

Muitos estudos explanam que para um melhor resultado pode-se fazer uma modelagem multicritério explorando diferentes combinações entre técnicas diferentes, nesses modelos a abordagem *fuzzy* é a mais recorrente. Agregações entre os sistemas *fuzzy* AHP frequentemente são usadas (LIMA JUNIOR; CARPINETTI; OSIRO, 2011).

A tomada de decisão com vários critérios usando o a lógica *fuzzy* (Lógica Nebulosa ou Lógica Difusa) é uma ferramenta poderosa que permite aos pesquisadores explorar várias soluções possíveis de problemas e ao mesmo tempo aceitar o fato de que a solução para uma situação não pode ser expressa apenas como resultado binário (sim ou não), pois esta técnica incorpora a forma humana de pensar, se configurando como uma teoria matemática para representar incertezas (SANTOS *et al.*, 2017)

O AHP foi desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1980, nos Estados Unidos da América (EUA). É uma metodologia que pode ser aplicada a inúmeras situações onde existam complexas estruturas determinando uma solução de escolha. Faz matematicamente comparações pareadas entre fatores em conjunto aos julgamentos e pesos de especialistas com intuito de avaliar critérios qualitativos. Basicamente, Saaty uniu matemática à psicologia, possibilitando organizar as forças do mais geral e menos controlável ao mais específico e controlável, usando a capacidade humana inata a fazer julgamentos sobre problemas pequenos. Ao invés de prescrever uma decisão “correta”, O AHP auxilia os tomadores de

decisão a conjecturarem uma melhor solução que se adapte aos objetivos e ao entendimento do problema (SAATY, 1990). Por isto o método AHP tem sido usado em problemas espaciais de localização (CHANDIO *et al.*, 2013). Em uma abordagem assim, os atributos são gerenciados e ajustados em um ambiente SIG, de maneira a convergir dados vetoriais e matriciais para produção de um mapa final, evidenciando as potencialidades ou fragilidades para o envasamento da resposta do problema (SAATY, 2005; 1990).

Şener *et al.* (2010) fizeram um estudo combinando o AHP a um SIG para determinar o local de aterro sanitário mais adequado para a área de captação do lago Beyşehir em Konya, Turquia. A determinação da localização de aterros é um processo difícil e complexo, pois deve conciliar parâmetros sociais, ambientais, técnicos e econômicos. Ademais, se sujeita a vários critérios e regulamentos. Aliando um AHP com um SIG se tornou possível combinar um total de nove critérios (hidrogeológicos, uso do solo, declive, altura, aspecto e distância de assentamentos, águas superficiais, estradas e áreas protegidas) divididos em dois grupos, o de critérios ambientais e o de critérios econômicos. Devido a objetivos múltiplos e importantes serem difíceis de priorizar, técnicas de SIG (zoneamento de *buffer*, computação de vizinhança, distância de custo e análise de sobreposição) foram aplicadas. O mapa final de locais aptos para implantação do aterro sanitário foi preparado usando as nove camadas de critério por análises de sobreposição no ambiente SIG. Foi feita uma classificação dos dados em quatro classes de aptidão dentro da área de estudo: alta, moderada, baixa e muito baixa. Os resultados deste estudo foram compatíveis com observações de campo e dois locais foram sugeridos com aptidão alta para uso em aterro.

O trabalho realizado por Perpiña, Martínez-Llario e Pérez-Navarro (2013) apresenta um processo de avaliação multicritério em ambiente SIG para identificação de locais adequados para construção de usinas de biomassa em Utiel-Requena, zona provincial de Valência, Espanha. Diversos fatores foram levados em consideração sendo selecionados treze (declive do terreno, litologia, tipos de cultura, cobertura vegetal, acesso a estradas, fisiografia, biomassa, desenvolvimento econômico, potencial demanda, efeito na população, custos de transporte, geomorfologia, impacto visual) que estavam em concordância com os objetivos exigidos e informações disponíveis, para tanto, foram consultados especialistas e cumpridas normas vigentes. A partir disto, foram definidos os principais critérios (favoráveis e restritivos) dividindo-os em três grupos: ambientais, econômicos e sociais; por meio do *software Expert Choice* (utilizando matrizes de comparação paritárias) se avaliou os fatores selecionados e suas classes objetivando determinar os valores finais de cada um, posteriormente, foram avaliados e ponderados no contexto do Processo Analítico Hierárquico

(AHP) de forma a poder estabelecer uma ordem de importância relativa. Antes de aplicar regras de decisão em um ambiente SIG, as informações cartográficas tiveram de ser sobrepostas para integrar todos os fatores em uma única camada e quantificar os valores de cada alternativa. Processo entendido como a soma das fronteiras espaciais dos dados no caso de entidades poligonais, onde um conjunto de alternativas/polígonos são obtidos com os mesmos atributos homogêneos dos fatores das camadas anteriormente estabelecidas. Após sobrepor as camadas espaciais, a regra de decisão foi aplicada ao problema de objetivos simples e múltiplos critérios para obter o mapa de possibilidades acordado com a adequação. As melhores alternativas foram obtidas após a aplicação das duas regras de decisão: Soma Linear Ponderada (*Weighted Least Summation - WLS*) e Método do Ponto Ideal (*Ideal Point Method - IPM*). Após esse processo foi feita uma análise de sensibilidade de fatores e pesos utilizando o programa SIMLAB, este *software* utiliza o método Monte Carlo para determinar o nível de incerteza das previsões do modelo e as variáveis de entrada, objetivando identificar o efeito das variações de fator e peso nos resultados do modelo, garantindo assim que os resultados sejam mais confiáveis, identificando os fatores pelos quais eles são significativamente influenciados. O estágio final do problema de decisão consistiu em uma análise de sensibilidade do conjunto de fatores e seus pesos associados usando dois métodos globais baseados em variância, o Método Sobol e o método FAST estendido. A etapa de crucial importância para o bom desenrolar do trabalho foi a seleção dos fatores e critérios, pois estes tiveram uma influência direta na atividade ou instalação em questão. A utilização de uma análise multicritério (*Multi-Criteria Assessment - MCA*) em um ambiente SIG forneceu informações sobre os fatores mais influentes no modelo para auxiliar nas decisões de planejamento de energia, como fisiografia, tipos de cultura, vegetação, demanda potencial e custo de transporte. Neste estudo as áreas mais adequadas para implantação da usina de biomassa estão localizadas próximas a zonas residenciais.

Demesouka, Vavatsikos e Anagnostopoulos (2013) fizeram uma análise de adequação de aterro sanitário baseada em SIG combinando AHP e métodos de programação por compromisso (*Compromise Programming - CP*) para região de Trácia na Grécia. Os critérios de análise e restrições foram selecionados de acordo com um extenso levantamento da literatura e o quadro legislativo nacional. No que tange a revisão bibliográfica, os autores citam ter encontrado trinta e cinco artigos em periódicos, desde 1983, com prática comum ao desenvolvimento de abordagens para identificar locais mais adequados para a localização de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU); ao todo, os critérios de decisão utilizados nesses variados trabalhos foram: Processo de Hierarquia Analítica (AHP), Processo

de Hierarquia Analítica Difusa (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process - FAHP*), Processo de Rede Analítica Difusa (*Fuzzy Analytic Network Process - FANP*), Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multiattribute Utility Theory - MAUT*), Agregação pelo Operador (*Ordered Weighted Average - OWA*) e Combinação Linear Ponderada (CLP). De acordo com suas preferências e em conformidade com a pesquisa bibliográfica, os critérios de avaliação e exclusão escolhidos foram divididos em cinco categorias principais (hidrogeológicos; solo e geomorfologia; ambiental; socioeconômico; design técnico econômico) para formar um modelo hierárquico de quatro níveis para o emprego de métodos de programação de compromisso e métrica de distância (*TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*; distâncias euclidiana, de Chebychev e de Manhattan). Para uma integração com o ambiente SIG no *software* ESRI ArcGIS desenvolveram por meio da linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*) um complemento, que permitiu o gerenciamento eficaz das propriedades e métodos suportados pelo *ArcObjects*. Neste trabalho foi permitida a execução de vários critérios sociais, ambientais e econômicos no problema de triagem do aterro, vinte e oito fatores foram selecionados de acordo com a revisão de literatura, destes, treze foram usados como restrições com o objetivo de excluir locais inadequados para a implantação de aterros e quinze formaram os critérios de decisão da análise multicritério com o objetivo de fornecer os atributos de classificação de alternativas. O processo de avaliação foi conduzido com a assistência de dois especialistas que forneceram os julgamentos de valor necessários para preencher as matrizes de comparação de pares do AHP. Por fim, as classificações das localizações candidatas foram obtidas usando métodos de programação de compromisso.

Kühmaier, Kanzian e Stampfer (2014) utilizaram um modelo de análise de decisão multicritério espacial para determinar áreas adequadas para o armazenamento de madeira para produção de energia de biomassa na região de Styria, Áustria. A identificação com confiabilidade de localizações de terminais de madeira para energia (*Energy Wood Terminal - EWT*) requer a consideração de informações espaciais e as preferências das partes interessadas. Assim, foram definidos vinte e seis critérios de avaliação apropriados e as preferências das partes interessadas (incluindo pesquisadores e gerentes operacionais), sendo estas últimas atribuídas pelo método AHP. Restrições espaciais foram empregadas para limitar a área total a locais de armazenamento potencialmente adequados. Dentro da máscara de critérios de avaliação, conjuntos *fuzzy* e preferências das partes interessadas foram combinados para calcular um índice de adequação. Para o planejamento de potenciais EWTs, existem áreas que são adequadas e outras absolutamente inadequadas. Entre esses extremos,

existe uma região de transição com uma gradação contínua na adequação. Isto posto, a teoria dos conjuntos *fuzzy* é recomendada, visto que ela permite a avaliação gradual da participação dos elementos em um conjunto. Para todas as análises espaciais, foi utilizada a tecnologia de SIGs. Como resultado alcançaram oitenta e dois pontos potenciais de EWT para a área total de estudo.

Silva, Alçada-Almeida e Dias (2014) utilizaram uma metodologia espacial multicritério para decidir a localização de usinas de biogás na região de Entre-Douro-e-Minho em Portugal, integrando métodos de apoio à decisão e técnicas de SIG. Neste estudo, dois especialistas definiram treze critérios, sendo onze quantitativos (representados por distâncias) e dois qualitativos (ocupação e uso dos solos; solos agrícolas); dividindo-os em três grupos: ambiental, econômico-social e segurança. Para obtenção de uma matriz de decisão que indicasse o desempenho de cada alternativa em cada fator, foram calculados os valores mínimo e máximo de todos os fatores em cada região, para tanto foi utilizada a ferramenta de Análise por Estatística Zonal (*Zonal Statistics* do *Spatial Analyst*) do *software* ArcGIS. O uso de SIGs propiciou gerenciar e processar informações espaciais com a flexibilidade do Apoio Multicritério à Decisão (*Criteria Decision Analysis - MCDA*) para avaliar informações factuais (tipo de solo, declive, infraestruturas) com informações mais subjetivas (opinião de especialistas). O método MCDA empregado foi o ELECTRE TRI, classificando as alternativas de acordo com categorias predefinidas considerando os múltiplos critérios. Os resultados mostraram que o modelo baseado em SIG, ao integrar dados espaciais e informações não espaciais, foi capaz de fornecer uma visão ampla e multidimensional sobre o potencial de desenvolvimento de sistemas de bioenergia na área de estudo.

Ioannou *et al.* (2018) apresentaram um SADE para permitir aos gerentes localizar as áreas mais adequadas para a instalação de usinas de biomassa na Unidade Regional de Drama, Grécia. Eles usaram as funções de lógica difusa (*fuzzy*) para criação de camadas de critérios e mapas de adequação. Combinaram o método AHP com elementos *fuzzy* para determinação dos coeficientes de peso dos critérios participantes. Fatores que afetam a instalação de uma usina de biomassa foram classificados em três categorias principais: técnica, econômica e ambiental, a depender da localização geográfica, da estrutura socioeconômica da área estudada e dos atributos biofísicos. Estes fatores foram ainda divididos em duas outras categorias: favoráveis e desfavoráveis. Após, criaram uma proposta final que dividiu a área de estudo em quatro categorias de acordo com sua adequação (unidade potencial de biomassa; camada de restrição; distâncias da rede de transferência de energia e transporte; distâncias das fazendas). Esses procedimentos todos foram integrados por meio de um ambiente SIG

possibilitando gerar um mapa final com o resultado de adequação da terra para instalação de usinas de biomassa. Uma vantagem apresentada diante da estrutura proposta por este trabalho é que ela pode ser facilmente modificada para estudar outros tipos de fontes de energias renováveis, simplesmente modificando os critérios relacionados.

Laasasenaho *et al.* (2019) colocam que a fundação de uma nova usina de bioenergia é sempre uma questão geoespacial, por isto, fizeram um estudo de caso para a região rural de Kuudetaan em South Ostrobothnia, Finlândia, com finalidade de mostrar que as ferramentas SIG são úteis na tomada de decisão relacionada a bioenergia, para identificar o potencial e otimizar o transporte de biomassa, além de ajudar o dimensionamento de usinas de energia quando os locais não forem definidos com antecedência. Os locais ideais foram determinados usando ferramentas de otimização de localização no *software* R, e os locais ideais dos terminais de biomassa foram determinados usando ferramentas de densidade kernel no ArcGIS. O planejamento de locais para usinas de bioenergia tende a ser uma tarefa muito exigente, devido ao conhecimento necessário preciso sobre a disponibilidade, a produção e as características químicas da biomassa. Assim sendo os estudos foram divididos em duas abordagens baseadas em SIG: análises de adequação e análises de otimização. As primeiras, também chamadas de Avaliações Multicritério (*Multi-Criteria Evaluations - MCEs*), são a parte do processo que as análises de *buffer* e de sobreposição espacial são usadas para avaliar a localização de fontes de produção de biomassa; as segundas são usadas para questões de alocação de localização combinando o fornecimento de biomassa e as demandas de energia. As análises de adequação foram baseadas na integração de diferentes modelos e técnicas analíticas em um ambiente SIG (cadeias de Markov; modelos multicritério; AHP e álgebra de mapas; análise de densidade kernel). As análises de otimização foram baseadas no algoritmo de otimização de rotas Dijkstra, dados de sensoriamento remoto e modelagem mista de integração linear em ambiente SIG. Como resultado foi possível encontrar, na área de estudo, locais logisticamente viáveis para usinas de biogás. A ferramenta de otimização de localização no *software* R identificou logisticamente *clusters* viáveis de fazendas e outros locais de fonte de biomassa para produção futura de biogás, e a ferramenta de densidade de kernel no *software* ArcGIS identificou as biomassas florestais mais densas perto de redes de estradas para futuros terminais de madeira, provando que essas ferramentas podem auxiliar tomadores de decisão e desenvolvedores de negócios a planejar a localização de usinas de bioenergia.

4 METODOLOGIA

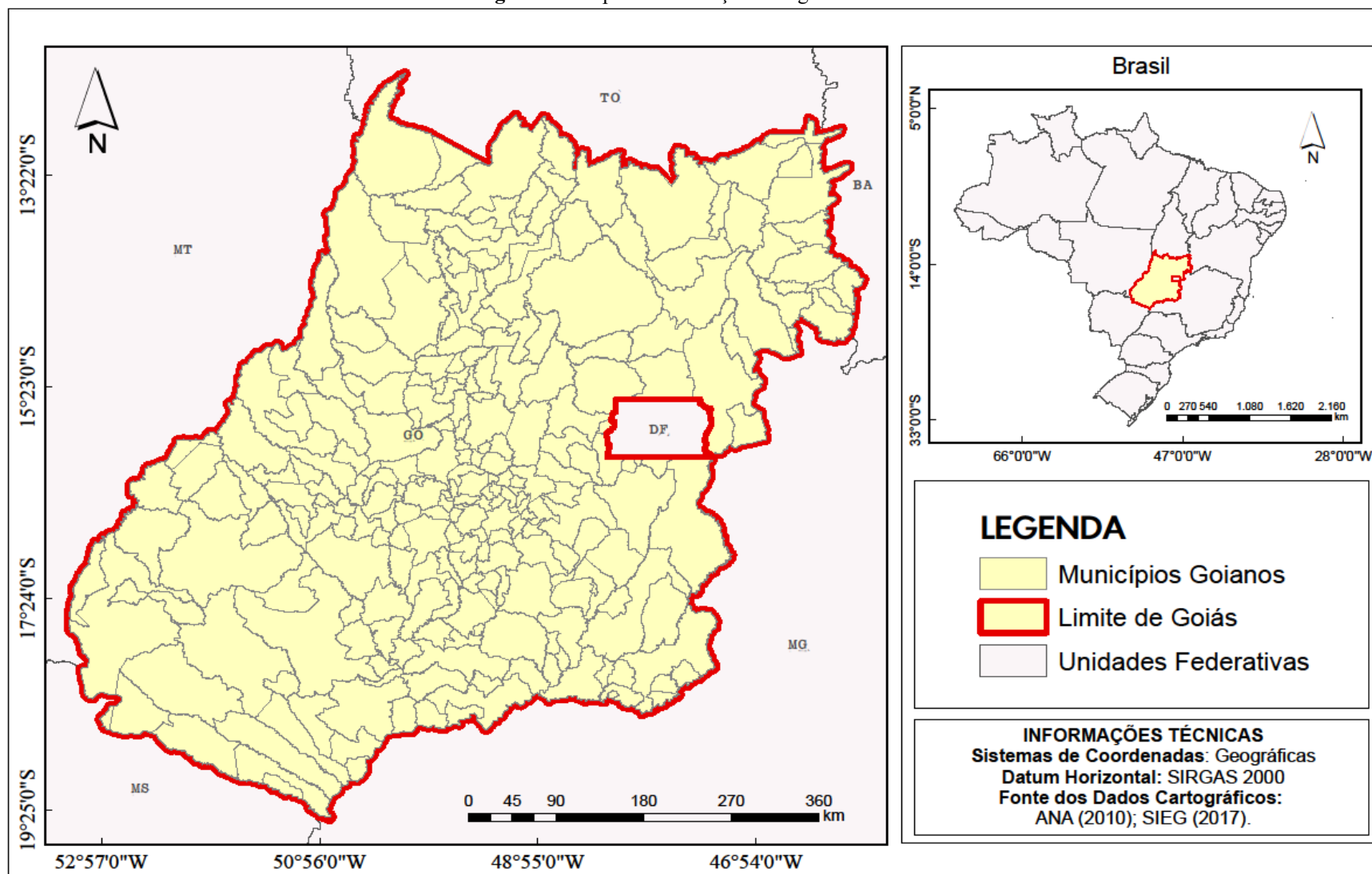
Na metodologia são apresentadas a localização e a caracterização da região de estudo, bem como, os materiais que foram utilizados para a realização do trabalho e os procedimentos metodológicos.

4.1 Localização e caracterização da área de estudo

O local escolhido para a realização do presente trabalho foi o estado de Goiás (GO) (Figura 1), situado na região Centro-Oeste do Brasil (BR). Ao norte limita-se com o estado do Tocantins (TO); ao sul com os estados de Minas Gerais (MG) e Mato Grosso do Sul (MS); a leste com os estados da Bahia (BA) e Minas Gerais e a oeste com o estado do Mato Grosso (MT); envolvendo ainda quase todo o Distrito Federal (DF), exceto seu extremo sudeste (REIS *et al.*, 2015). O Estado de Goiás possui uma área territorial de 340.203,329 km² (IBGE, 2019) e é composto por 246 municípios (SIDRA, 2019).

Goiás é o sétimo maior estado brasileiro e o mais populoso do Centro-Oeste, possui uma população de 7 (sete) milhões de habitantes e uma densidade demográfica de 17,65 pessoas•km⁻². Abrigando povos diversificados, desde indígenas e calungas até migrantes vindos de todas as partes do país. É composto predominantemente sob o bioma Cerrado [com exceção de 3% da área do extremo sul com domínio da Mata Atlântica (NASCIMENTO, 2017)]., com vegetação marcada por árvores e arbustos tortuosos, cascas grossas e raízes profundas, com um bioma de flora rica que abriga ao menos 11,6 mil espécies de plantas já catalogadas. O clima é tropical com verões chuvosos e invernos secos, onde cerca de 95% das precipitações anuais são registradas entres os meses de outubro e abril. A temperatura pode atingir 12°C em períodos considerados mais frios e 34°C em épocas ponderadas como mais quentes. As características fisiográficas favorecem a agricultura e a pecuária, apresentando baixa declividade (65% da superfície são relativamente planas – chapadões); às margens dos rios Araguaia e Tocantins predominam ligeiras ondulações; as elevações não ultrapassam 1.676 metros de altitude. Quanto à hidrografia têm-se as nascentes de drenagens alimentadoras de três importantes bacias: Araguaia/Tocantins, São Francisco e Paraná (GOIÁS, 2019).

Figura 1 – Mapa de localização da região de estudo



Fonte: A autora (2021).

Sobre as condições edáficas, o estado apresenta predominância de solos classificados como Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos (29,74% e 14,75%, respectivamente); seguidas por solos do tipo Cambisolos (19,09%), associação de Argissolos e Nitossolos (13,53%), Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos (11,34% e 3,58%, respectivamente), Plintossolos (3,79%), Gleissolos (2,90%), entre outros (1,28%) (REIS *et al.*, 2015).

Quanto ao uso e cobertura do solo, a agropecuária ocupa 63,27% do território, com 46,14% de pastagens e 16,92% de agricultura (onde 2,81% correspondem à cana-de-açúcar); as florestas preenchem 30,90% da extensão territorial (o Cerrado faz-se presente em 97% destas áreas) com 30,58% correspondendo à floresta natural e 0,31% a floresta plantada; a formação natural não florestal ocupa 4,03% do território; as áreas não vegetadas somam 0,78% sendo atribuídos 0,50% a área urbana; e os corpos d'água somam 1% (MAPBIOMAS, 2020).

Em termos de rodovias o estado de Goiás é cortado por 27 rodovias federais e 217 estaduais, a malha rodoviária tem um dimensionamento de 27.904 km de extensão. Em se tratando de ferrovias, existem a Ferrovia Norte-Sul (em construção), a Ferrovia Norte Brasil S.A. (em construção), a Integração Centro-Oeste (em planejamento) e a Ferrovia Centro-Atlântica (em operação) (REIS *et al.*, 2015).

4.2 Procedimentos metodológicos

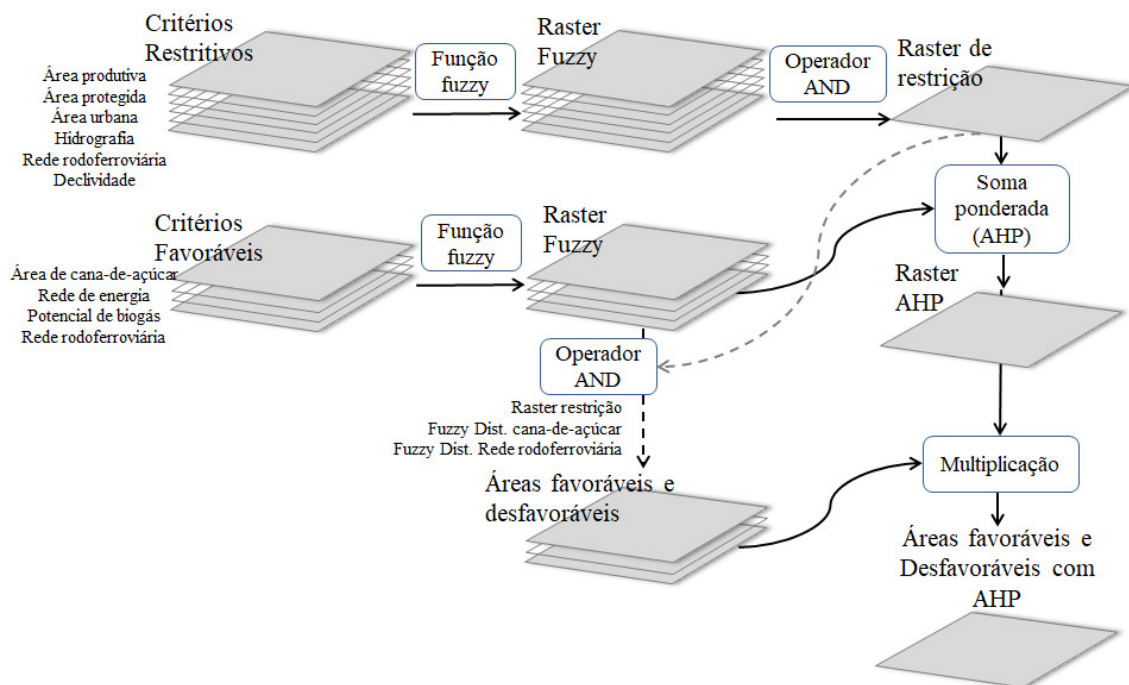
Os procedimentos metodológicos realizados para a execução do presente estudo foram subdivididos em seis etapas.

Foram realizadas buscas na literatura que abordavam a temática proposta com o intuito de propiciar a escolha de um ou mais métodos de apoio à decisão que pudessem ser integrados a um ambiente SIG. Optou-se por utilizar a metodologia proposta por Ioannou *et al.* (2018), adaptada para o estado de Goiás. Foi usado o AHP com inferência *fuzzy* aliados ao QGIS (versão 3.16.3).

A técnica aplicada consistiu em verificar a quantidade de cana-de-açúcar produzida bem como a quantidade de energia que poderia ser gerada com o recurso renovável oriundo da matéria orgânica acessível. A instalação de uma usina de biomassa é influenciada por diversos fatores. E estes foram selecionados em função de três critérios, que foram ainda subdivididos em “favoráveis” e “restritivos”. Todos os fatores foram expressos em camadas matriciais e para sua criação a lógica *fuzzy* (difusa ou nebulosa) e suas funções de pertinência

foram aplicadas. Para ponderar o peso que cada camada teria no *raster* final o AHP foi usado, combinando as camadas. O *layer* (camada) resultante forneceu as áreas com adequabilidade para a instalação de centrais de produção de energia de biomassa na unidade federativa de Goiás. A seguir, na figura 2, é mostrado o fluxograma metodológico central da execução desta pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma metodológico central deste trabalho



Fonte: A autora (2021).

4.2.1 Critérios e fatores

Os critérios que influenciam a implantação de uma usina de biomassa podem ser classificados em três categorias principais: técnica, econômica e ambiental. Ou seja, precedentemente à seleção de áreas promissoras para o local de instalação, é preciso atentar à conta da legislação vigente, considerações humanas (sociais) e ambientais (meios físico, biótico e antrópico). Verificando fatores que estão ligados à localização geográfica, a disposição socioeconômica da extensão territorial de estudo, a atributos biofísicos e aos interesses individuais dos indivíduos, respeitando o meio em que habitam (FNR, 2016; IOANNOU *et al.*, 2018).

Sendo assim, tem-se que considerar toda a regulamentação incidente sobre o tema, com destaque para:

- i) Regularização ambiental (licenciamento ambiental, cadastro técnico federal – CTF, supressão de vegetação e uso de recursos hídricos);

- ii) Aproveitamento energético do biogás como combustível (GNV - Gás Natural Veicular ou GN – Gás Natural), energia térmica ou elétrica;
- iii) Produção, comercialização e utilização do biofertilizante produzido (GOMES *et al.*, 2016).

O uso e cobertura atual do solo é um dos principais critérios que afetam o local da instalação, sendo a definição de uso e cobertura do solo profundamente conectada às ações humanas sobre a terra, seja pela necessidade de sobrevivência ou pela busca de benefícios. Então não se deve propor a instalação em zonas que incluem áreas de concentração de recursos hídricos, cidades, vilas, assentamentos, áreas indígenas e quilombolas, pântanos, lagos, rios, estradas, áreas protegidas, terras agrícolas, áreas com declives acentuados, etc (BREWER *et al.*, 2015; FNR, 2016). Outro fator essencial é a disponibilidade de ligações de transporte (ferrovias e rede rodoviária); é mais fácil mover suprimentos pela rede de transporte existente visto que reduz o custo e os prováveis danos ao meio ambiente que podem ser causados pela criação de nova rede. Critérios técnicos econômicos adicionais que devem ser levados em consideração consistem na proximidade das plantações de cana-de-açúcar e da rede de transferência de energia; a proximidade das plantações é importante porque elas constituem um meio contínuo de produção de biomassa e o critério rede de transferência de energia é semelhante à proximidade da rede de transporte existente (ARABATZIS; MYRONIDIS, 2011; CHARABI; GASTLI, 2011; FNR, 2016; CIOLKOSZ *et al.*, 2017; PURDY *et al.*, 2018).

Desta maneira, foram elencados e coletados dados numéricos, vetoriais e matriciais que representam os fatores criteriosais que influenciam diretamente na instalação de uma usina de bioenergia, para que pudessem ser submetidos a uma análise multicritério no *software* de SIG QGIS (versão 3.16.3).

Os 12 (doze) fatores avaliados em função dos critérios adotados e que compuseram as variáveis preditivas foram:

1. Produção da cana-de-açúcar (técnico e econômico);
2. Produção de biocombustível (técnico e econômico);
3. Produção de açúcar e álcool (técnico e econômico);
4. Comunidades quilombolas (ambiental);
5. Rede hidrográfica (ambiental);
6. Perímetros urbanos (ambiental);
7. Trechos de energia (econômico e ambiental);
8. Trechos ferroviários e rodoviários (ambiental e econômico);

9. Terras indígenas (ambiental);
10. Declividades (econômico);
11. Unidades de conservação (ambiental); e,
12. Terras de agricultura e silvicultura (ambiental).

4.2.2 Variáveis preditivas

Após elencar os 12 (doze) fatores que pudessem ser usados como parâmetros de predição, estes foram agrupados por semelhança de características e divididos em dois grupos de variáveis:

- aquelas que contribuem de forma favorável; e,
- aquelas que contribuem de forma desfavorável (restritivas).

As 6 (seis) variáveis preditivas restritivas estabelecidas foram:

1. Área produtiva (incluem-se áreas agrícolas e de silvicultura);
2. Área protegida (incluem-se unidades de conservação, comunidade quilombola e terra indígena);
3. Área urbana (incluem-se perímetros urbanos);
4. Corpos d'água (incluem-se hidrografias - rios, lagos, aquicultura);
5. Rodoferroviária (incluem-se rodovias e ferrovias); e,
6. Declividade (incluem-se as inclinações da superfície do terreno em relação à horizontal).

E, as 4 (quatro) variáveis preditivas favoráveis instituídas foram:

1. Cana-de-açúcar (incluem-se as áreas de cana-de-açúcar para produção de açúcar e álcool);
2. Trecho de energia (incluem-se as redes de energia existentes);
3. Biocombustível (inclui-se a produtividade do biogás oriundo do bagaço, da vinhaça, da torta de filtro, das palhas e das pontas; todos obtidos por causa do processo de produção de açúcar e álcool); e,
4. Transporte (incluem-se rodovias e ferrovias, áreas de transporte de biomassa).

4.2.3 Coleta de dados

As camadas vetoriais (*shapefile*) e matriciais (*Tagged Image File Format*) geográficas, assim como os dados numéricos, foram coletados nas seguintes plataformas:

- ANA – Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2010), disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=72&currTab=simple>. Limites do Brasil (vetorial);
- SIEG – Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (GOIÁS, 2017), disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>. Limites do estado de Goiás (vetorial); comunidades quilombolas (vetorial); rede hidrográfica (vetorial), escala 1:100k; perímetros urbanos (vetorial); trechos de energia (vetorial), escala 1:100k; e, trechos ferroviários e rodoviários (vetorial), escala 1:100k;
- FUNAI – Fundação Nacional do Índio, disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>. Terras indígenas (vetorial);
- TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (VALERIANO; ROSSETTI, 2012), disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>. Declividade (matricial).
- MMA – Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2020), disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Unidades de Conservação (vetorial);
- MapBiomas (SOUZA *et al.*, 2020), disponível em: <https://mapbiomas.org/download>. Dados matriciais de uso e cobertura da terra para o ano de 2019, incluindo áreas de vegetação natural, cana-de-açúcar, outras áreas agrícolas e silvicultura (matricial);
- PAM – Produção Agrícola Municipal, disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Produção da cana-de-açúcar (numérico).
- UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar, disponível em: <https://bit.ly/3q0p7DH>. Produção de açúcar e álcool (numérico);
- GISMAPS – Soluções em Geoprocessamento e Mapeamento para Negócios, disponível em: <https://gismaps.com.br/downloads/usinas-de-acucar-e-alcool-no-brasil-shp/>. Localização pontual de usinas de cana-de-açúcar.

4.2.4 Manipulação dos dados

O potencial de geração de energia produzida a partir de uma usina de biomassa é relativo à quantidade de biomassa disponível (IOANNOU *et al.*, 2018). Sendo assim, foi necessário obter os dados de produção de cana-de-açúcar (e seus principais derivados) no estado de Goiás por município, possibilitando calcular a quantidade de bioenergia que poderia ser produzida.

Com os dados tabulados de produção de cana-de-açúcar por município em toneladas por hectare ($t \cdot ha^{-1}$), no estado de Goiás, e sua biomassa disponível para geração de energia, estes foram unidos (*join*), no *software* livre QGIS (versão 3.16.3), juntamente a uma camada vetorial representativa dos municípios do estado. Esse procedimento teve por intuito gerar dois dados vetoriais, um da produção da cana-de-açúcar e outro com a quantificação do biogás a ser gerado a partir da biomassa disponível por município. Para unir a base de dados numéricos ao vetor do estado recorreu-se aos programas *Microsoft Excel* (versão 2010), para confeccionar uma tabela e exportar em formato CSV (*Comma Separated Value*), e QGIS (versão 3.16.3), para realizar a união da tabela com os atributos ao *shapefile* dos municípios.

Para o cálculo da biomassa disponível foram consideradas as quantidades de resíduos gerados na produção de açúcar (torta de filtro) e álcool (vinhoto, vinhaça, tiborna ou restilo), assim como bagaço, palhas e pontas, oriundos da moagem e colheita da planta. Considerou-se que a cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados 250 kg de bagaço, 204 kg de palhas e pontas (TORQUATO; RAMOS, 2013) e 40 kg de torta de filtro com extração via filtragem do caldo de cana-de-açúcar moída (COELHO, 2017); e, a cada litro de álcool produzido são gerados 12 litros de vinhaça (COELHO, 2017).

Para mensurar o biogás a ser gerado mediante a quantidade de biomassa ao dispor foi considerado que a cada tonelada de resíduos de gramíneas produz-se 200 Nm^3 de biogás (FNR, 2016), que a cada tonelada de torta de filtro são gerados 120 Nm^3 de biogás e a cada metro cúbico de vinhaça gera-se 25 Nm^3 de biogás (COELHO, 2017).

Para gerar a camada matricial com a produção do biogás fez-se a rasterização da camada vetorial criada com os dados numéricos, via coluna da tabela de atributos com a sua produção em normal metro cúbico por ano ($\text{Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$), por município. Os dados vetoriais e matriciais foram manipulados na projeção cônica equivalente de Albers, código EPSG (*European Petroleum Survey Group*) 102033, para uniformização dos dados, visto que a projeção equivalente preserva o tamanho real da superfície representada. E o tamanho de pixel de todas as camadas foi de 90 m.

Sendo o uso e cobertura do solo um critério central que afeta o local de instalação, criou-se uma zona tampão (Tabela 1) ao redor das áreas urbanas, dos corpos d'água, das áreas

protegidas, das declividades, das estradas e ferrovias, pois não se pode usa-las para a instalação da central intencionada. Ademais, terras agrícolas (áreas de alta produtividade) também não podem ser empregadas para o uso posto (AL-YAHYAI *et al.*, 2012). Para tanto, primeiro, teve-se que calcular as distâncias a partir das feições, isto foi feito utilizando a ferramenta de distância euclidiana do QGIS (versão 3.16.3); após criar as áreas de distâncias foi necessário realizar uma reclassificação dos *rasters*, atribuindo o valor 0 (zero) para valores constantes na área de limitação da zona tampão e 1 (um) para valores a partir dos máximos estabelecidos para zona tampão, conforme a Tabela 1. Esse procedimento foi realizado por meio da ferramenta de reclassificação do QGIS (versão 3.16.3).

Tabela 1 – Base métrica para zona tampão das variáveis preditivas

Variável de fator criterial	Limitações
Declividade	Acima de 10% não é aceitável para as construções e para a acessibilidade de veículos
Área protegida	Essas zonas estão completamente fora dos limites
Corpos d'água	Zona tampão de 1000 m
Área produtiva	Terras de alta produtividade não se adéquam
Área urbana	Zona tampão de 5000 m
Rodoferroviária	Zona tampão de 500 m

Fonte: Adaptado de Ioannou *et al.* (2018).

Para as variáveis preditivas favoráveis, também foi realizado o procedimento de distância euclidiana, porém não foi criada nenhuma zona tampão. Após, no ambiente do QGIS (versão 3.16.3), foram efetuados os processos da lógica difusa das informações geradas, por meio do operador lógico matemático *fuzzy* com suas funções de pertinência linear, foi usada a ferramenta de fuzzificação (*fuzzify*) do SAGA GIS (versão 2.3.2) dentro do ambiente do QGIS (versão 3.16.3).

A lógica difusa foi aplicada visto que o método booleano (zero ou um, falso ou verdadeiro) rejeitaria muitas áreas que poderiam ser classificadas como aptas devido aos seus intervalos inflexíveis, o modelo nebuloso possui um intervalo variado entre zero e um, sendo assim uma variável contínua dentro desse espaço delimitado, tornando a transição de áreas não aptas para aptas com melhor aproximação da realidade.

As funções lineares de lógica *fuzzy* utilizadas para os seis critérios de restrição podem ser vistas a seguir (onde x é a distância das áreas e μ a associação difusa):

1. Para os dados referentes à distância (m) de áreas produtivas:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq 100 \\ \frac{x - 100}{300}, 100 < x \leq 400 \\ 1, x > 400 \end{cases}$$

2. Para os dados referentes à distância (m) de áreas protegidas:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq 100 \\ \frac{x - 100}{400}, 100 < x \leq 500 \\ 1, x > 500 \end{cases}$$

3. Para os dados referentes à distância (m) de áreas urbanas:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq 1000 \\ \frac{x - 1000}{4000}, 1000 < x \leq 5000 \\ 1, x > 5000 \end{cases}$$

4. Para os dados referentes à distância (m) de corpos d'água:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq 200 \\ \frac{x - 200}{200}, 200 < x \leq 400 \\ 1, x > 400 \end{cases}$$

5. Para os dados referentes à distância (m) de rodoferrovias:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq 100 \\ \frac{x - 100}{300}, 100 < x \leq 400 \\ 1, x > 400 \end{cases}$$

6. Para os dados referentes à declividade (%):

$$\mu = \begin{cases} 1, x \leq 3 \\ \frac{10-x}{7}, 3 < x \leq 10 \\ 0, x > 10 \end{cases}$$

Foi também utilizado o processo de lógica *fuzzy* para combinar as camadas favoráveis com propósito de obter como resultado arquivos matriciais de locais mais apropriados à produção de energia de biomassa.

As funções de pertinência *fuzzy* utilizadas para os quatro critérios favoráveis podem ser vistas a seguir [onde x é a proximidade (com exceção para o biogás, neste caso x descreve a produção) das áreas e μ a associação difusa]:

7. Para os dados que descrevem a proximidade (m) da área de transporte rodoferroviário:

$$\mu = \begin{cases} 1, x \leq 500 \\ \frac{1000-x}{500}, 500 < x \leq 1000 \\ 0, x > 1000 \end{cases}$$

8. Para os dados que descrevem a proximidade (m) da área de produção de cana-de-açúcar:

$$\mu = \begin{cases} 1, x \leq 500 \\ \frac{3000-x}{2500}, 500 < x \leq 3000 \\ 0, x > 3000 \end{cases}$$

9. Para os dados que descrevem a proximidade (m) referente ao trecho (da rede) de energia elétrica:

$$\mu = \begin{cases} 1, x \leq 100 \\ \frac{1000-x}{900}, 100 < x \leq 1000 \\ 0, x > 1000 \end{cases}$$

10. Para os dados que descrevem a produção do biogás ($\text{Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) em arquivo raster:

$$\mu = \begin{cases} 0, x \leq 5,76^{11} \\ \frac{2,4^{12} - x}{1,83^{12}}, 5,76^{11} < x \leq 2,4^{12} \\ 1, x > 2,4^{12} \end{cases}$$

O intuito final desta etapa foi obter como resultado arquivos matriciais de locais favoráveis e restritivos a produção de energia de biomassa podendo assim, na próxima etapa elaborar um *raster* que evidencie os locais mais propícios à produção de energia de biomassa para o estado de Goiás.

4.2.5 Geração do mapa preditivo final

Almejando o resultado final de confecção de um mapa digital, após fazer o *fuzzy* das seis camadas restritivas, foi feita a operação *AND* destas pela calculadora matricial do QGIS (versão 3.16.3), findando em um único arquivo restritivo (camada de restrição). Em seguida, foi utilizado o procedimento *AND* novamente para a camada restritiva *fuzzy* e as camadas favoráveis de distância, Cana-de-açúcar (proximidade das áreas de cana-de-açúcar) e Transporte (proximidade da rede de transporte de biomassa), findando em uma única camada (*AND fuzzy*) que, no final do processo, será multiplicada pela camada resultado do AHP. O operador *AND* retorna o valor mínimo dos conjuntos aos quais a localização da célula pertence, sendo essa técnica útil quando se espera identificar a condição desfavorável de um dos parâmetros, invalidando os demais para a associação de todos os critérios de entrada (LONGLEY *et al.*, 2013). O produto *fuzzy* dá origem à distribuições de possibilidade conjunta não interativas, tendendo a ter como resultado valores de pertinência muito pequenos, visto que se multiplicam diversos números menores do que 1 (um) (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001), onde, desta maneira, neste trabalho, finda por serem ressaltadas as características restritivas nesta operação entre as camadas se fazendo sobressair todos os valores locais que são definidos como 1 (um), assim privilegiando as características favoráveis dos *rasters* analisados.

Posteriormente, foram atribuídos pesos a cada uma das variáveis favoráveis fuzzificadas e a camada restritiva única, por meio do AHP para verificar seu grau de significância no processo. As ponderações foram estabelecidas a partir de revisão

bibliográfica e o modelo utilizado foi o implementado em linguagem de programação *Python* por Ioannou *et al.* (2018). A importância dos critérios pode ser vista na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Coeficientes de significância de peso por variável de fatores criteriosais

Variável	Coeficientes de significância de peso
Camada de Restrição	0,458
Rede de Transporte	0,033
Proximidade de Fazendas	0,142
Rede de Energia	0,07
Potencial de Biocombustível	0,297

Fonte: Ioannou *et al.* (2018).

Assim, usando a calculadora *raster* do QGIS (versão 3.16.3), foi feita a operação de soma ponderada utilizando os pesos do AHP (Tabela 2) para cada camada indicada de acordo com o seu grau de significância no processo. Multiplicou-se o valor do peso pela sua respectiva camada normalizada e assim, ao fim, fez-se as somas delas por critério gerando uma única camada de ponderação.

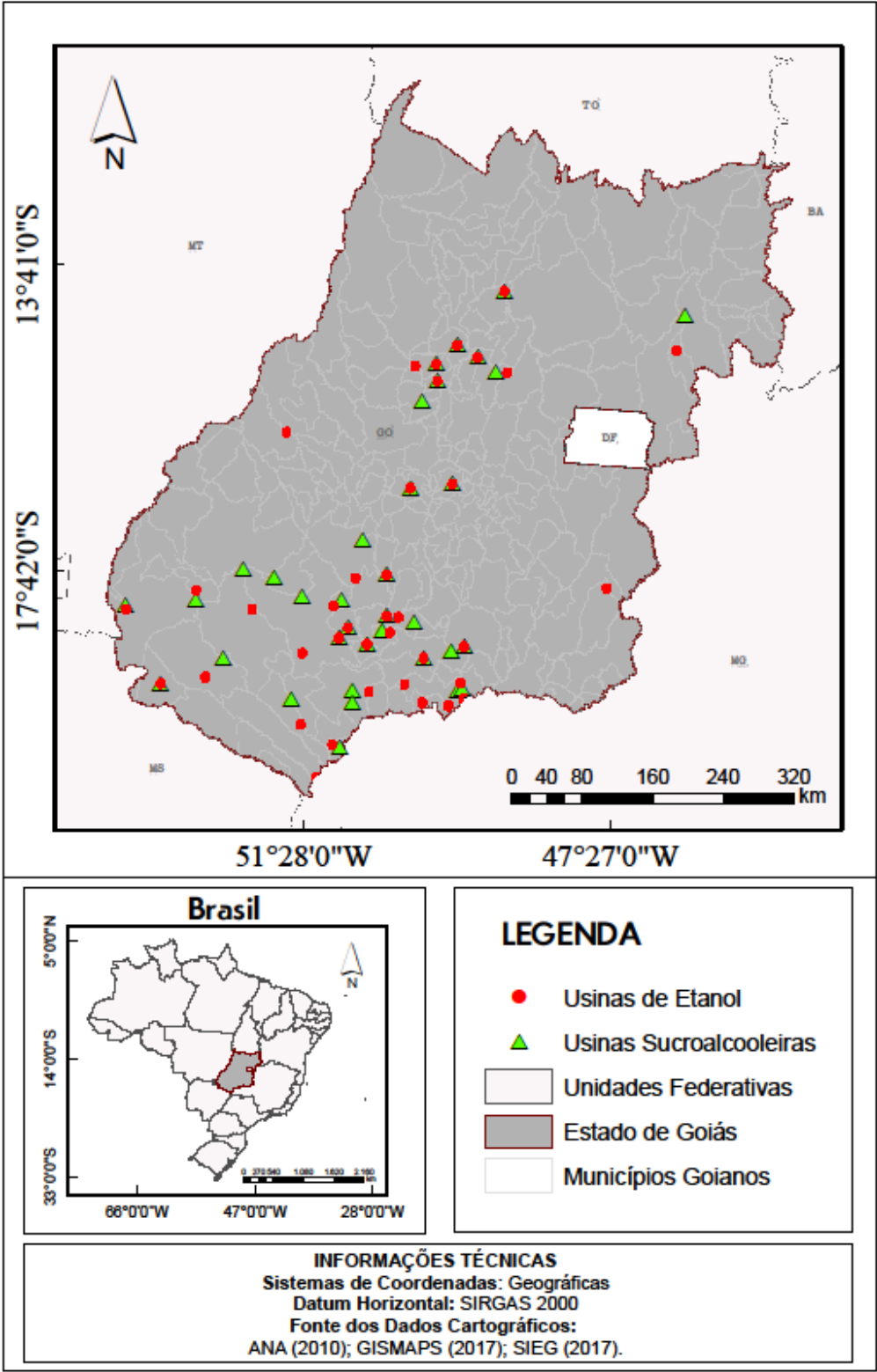
Completando a análise de sobreposição ponderada realizou-se a multiplicação da camada *AND fuzzy* pela camada gerada com os pesos do AHP, assim se obtendo uma camada matricial final indicando os melhores locais para instalação de uma usina de biomassa e pôde-se também quantificar a energia potencial a ser produzida em cada local estabelecido. Para este produto final foi feito um *webmap* na plataforma Github do Grupo de Estudos de Geomática do IFG para melhor visualização dos resultados.

4.2.6 Validação dos resultados

Para validar os resultados foram utilizados dados vetoriais com a localização de usinas de cana-de-açúcar (Figura 3), adquiridos da empresa GISMAPS (2017). E também dados sobre o panorama do biogás no Brasil fornecidos pela CIBIOGÁS (2019) (Figura 4). Os pontos em forma circular na cor vermelha representam as usinas de etanol, os em forma triangular na cor verde simbolizam as usinas sucroalcooleiras; os pontos em forma de marcador alfinete em preto simulam as usinas de biogás de pequeno porte e os em forma triangular na cor amarela, com um círculo preto central, as de médio porte.

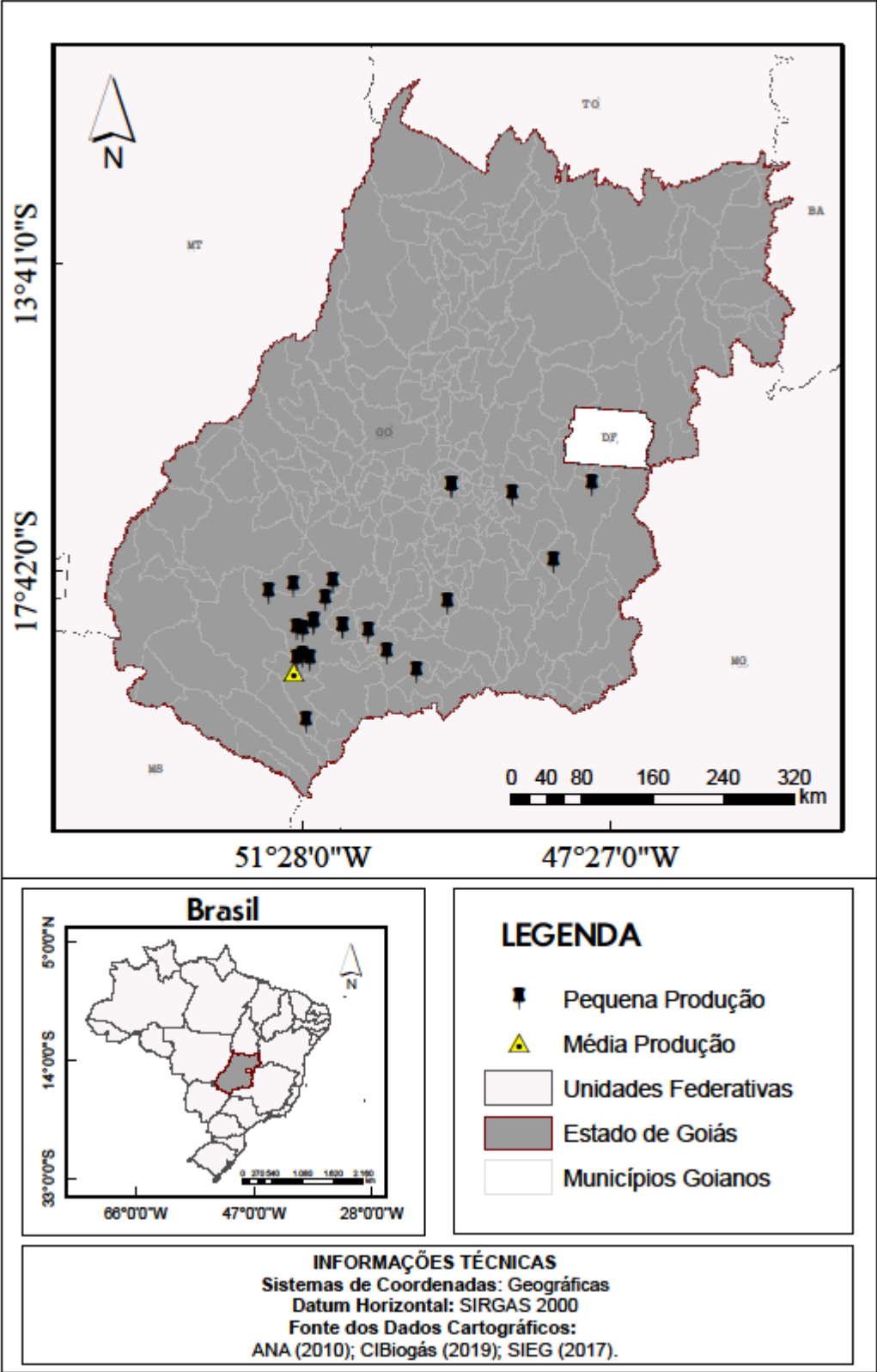
Quanto a produção de biogás, considerou-se que uma usina de pequena produção gera biogás em quantidade menor que $1.000.000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, e que uma usina de média produção gera biogás em quantidade entre $1.000.001$ e $5.000.000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ (CIBIOGÁS, 2019).

Figura 3 – Localização dos pontos vetoriais referentes a usinas de cana-de-açúcar



Fonte: A autora (2021).

Figura 4 – Localização das usinas de biogás instaladas em Goiás para produção de energia



Fonte: A autora (2021).

5 RESULTADOS

A seleção de critérios para a análise de melhores locais para implantação de usinas de biomassa implicou na escolha de vários fatores que tiveram que ser expressos em camadas lógicas de dados geográficos para que pudessem ser manipulados e posteriormente usados na confecção de um mapa, possibilitando uma análise geográfica dos locais de melhor localização para um biodigestor. Os resultados dessa álgebra de mapas são mostrados neste tópico.

5.1 Camadas de entrada das variáveis

Inicialmente foram selecionados 12 (doze) fatores que influenciam na escolha dos locais de instalação de usinas de biocombustível, esses fatores foram agrupados por semelhanças de características. Desta maneira, eles compuseram as 6 (seis) variáveis preditivas restritivas e as 4 (quatro) variáveis instituídas favoráveis.

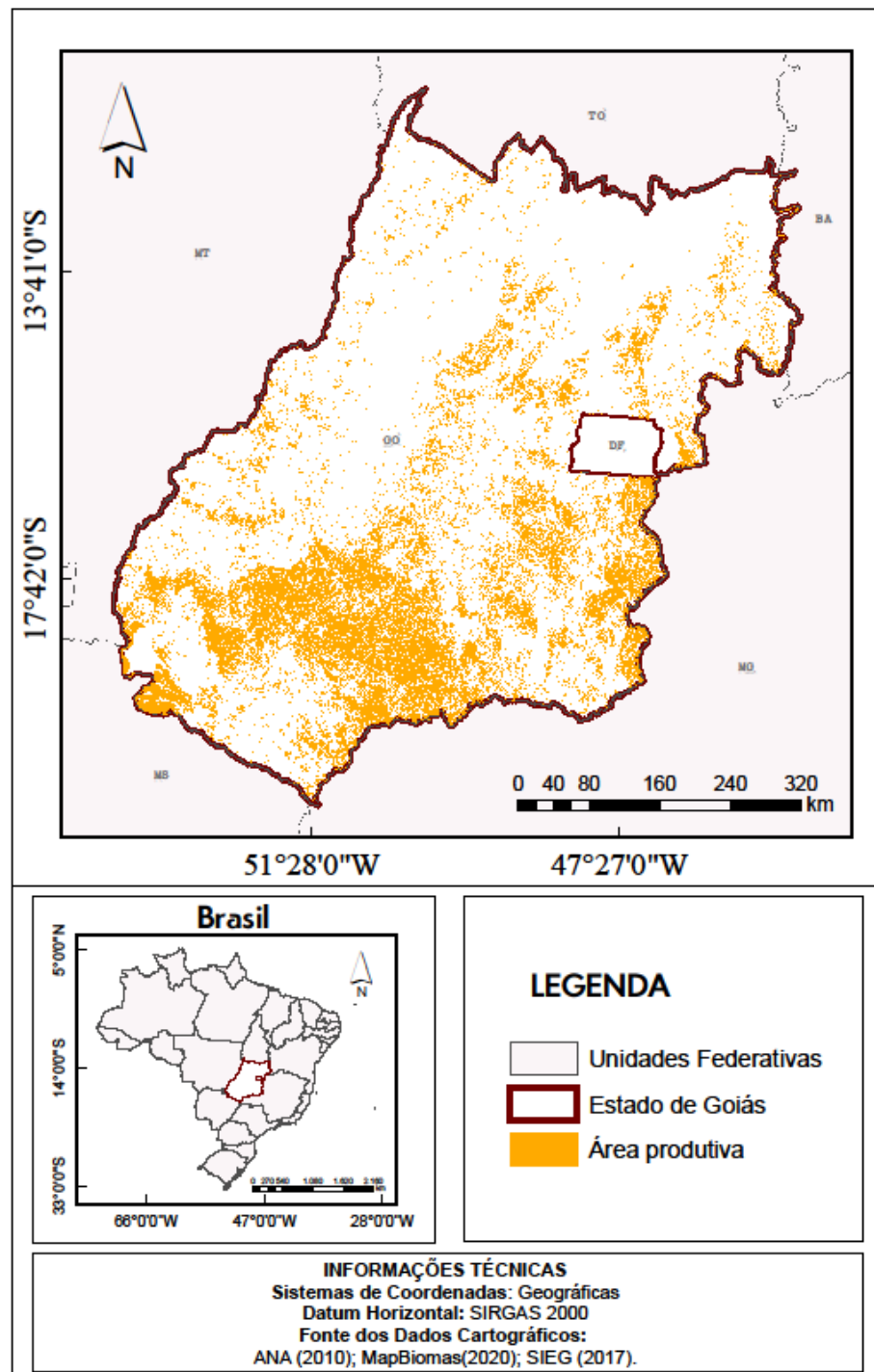
5.1.1 Camadas restritivas

As feições das variáveis estabelecidas como preditivas restritivas são mostradas a seguir:

1. Área produtiva (incluem-se áreas agrícolas e de silvicultura):

A presença de áreas com produtividade é representada em tom alaranjado (Figura 5).

Figura 5 – Representação gráfica da variável restritiva “Área produtiva” do fator criterial terras de agricultura e silvicultura

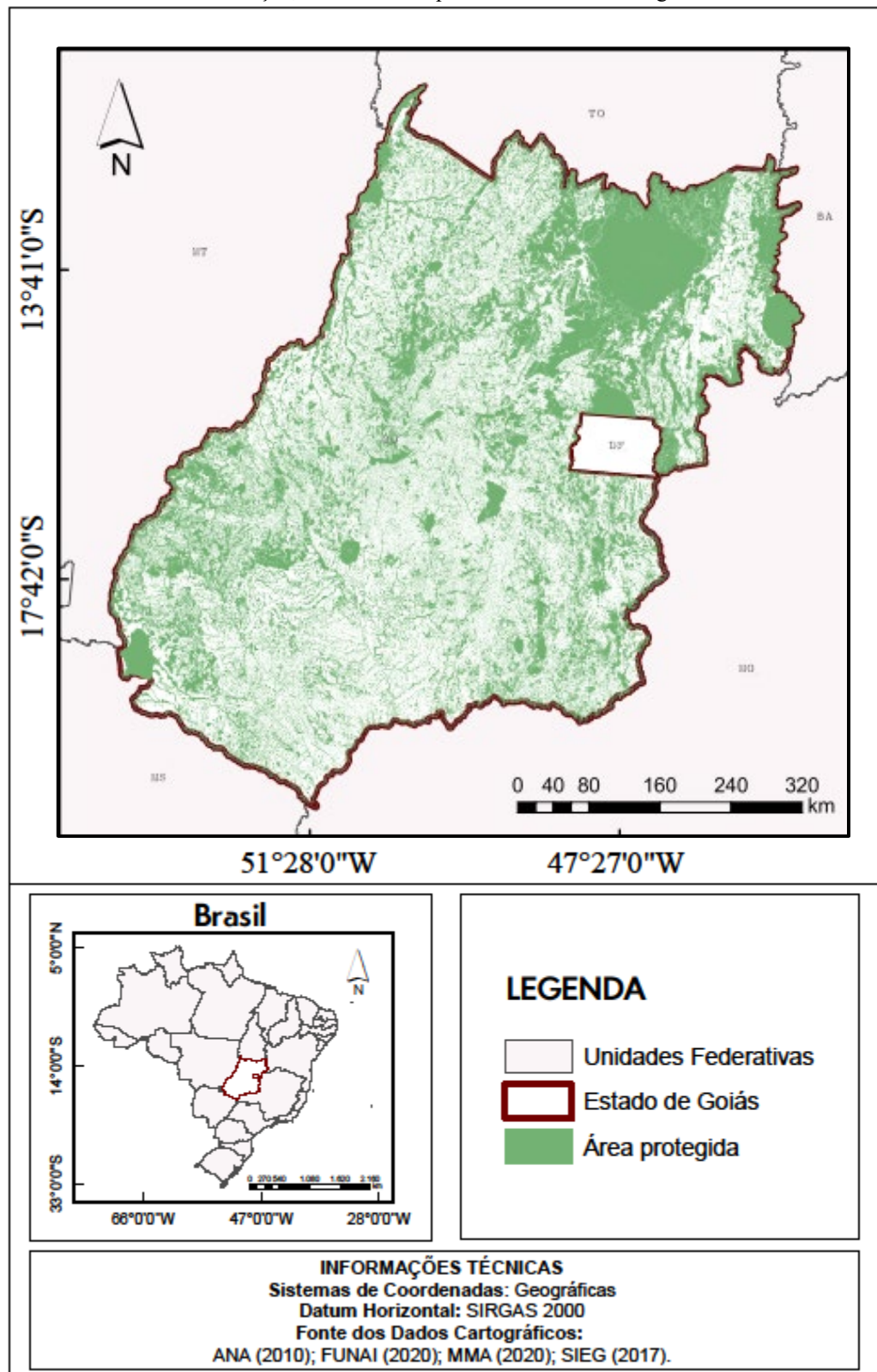


Fonte: A autora (2021).

2. Área protegida (incluem-se unidades de conservação, comunidade quilombola, terra indígena):

Em verde está representada a presença de áreas de conservação (Figura 6).

Figura 6 – Representação gráfica da variável restritiva “Área protegida” do fator criterial unidades de conservação, comunidades quilombolas e terras indígenas

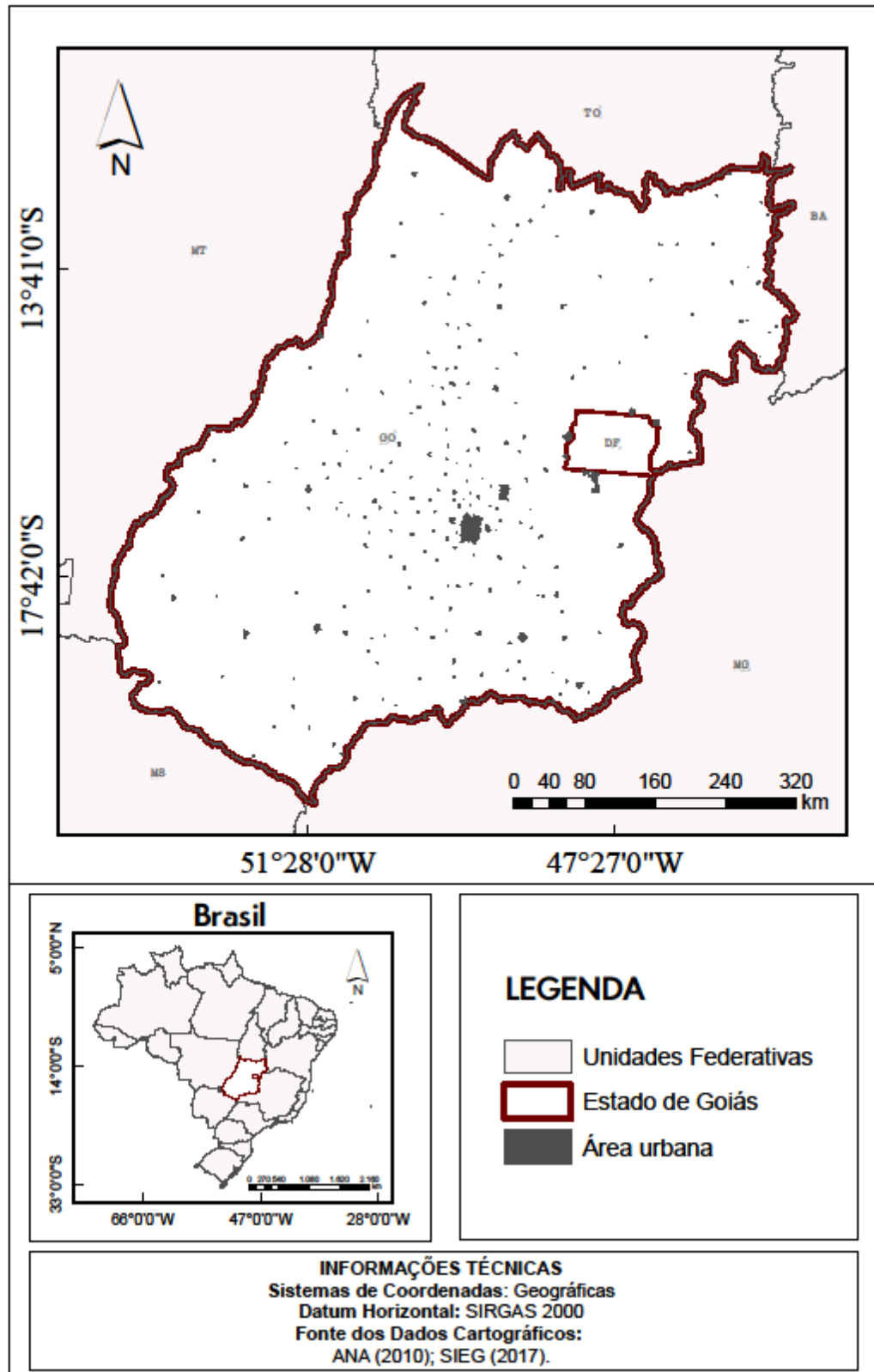


Fonte: A autora (2021).

3. Área urbana (incluem-se perímetros urbanos):

A presença de meios urbanos é simulada em cinza escuro (Figura 7).

Figura 7 – Representação gráfica da variável restritiva “Área urbana” do fator criterial perímetros urbanos

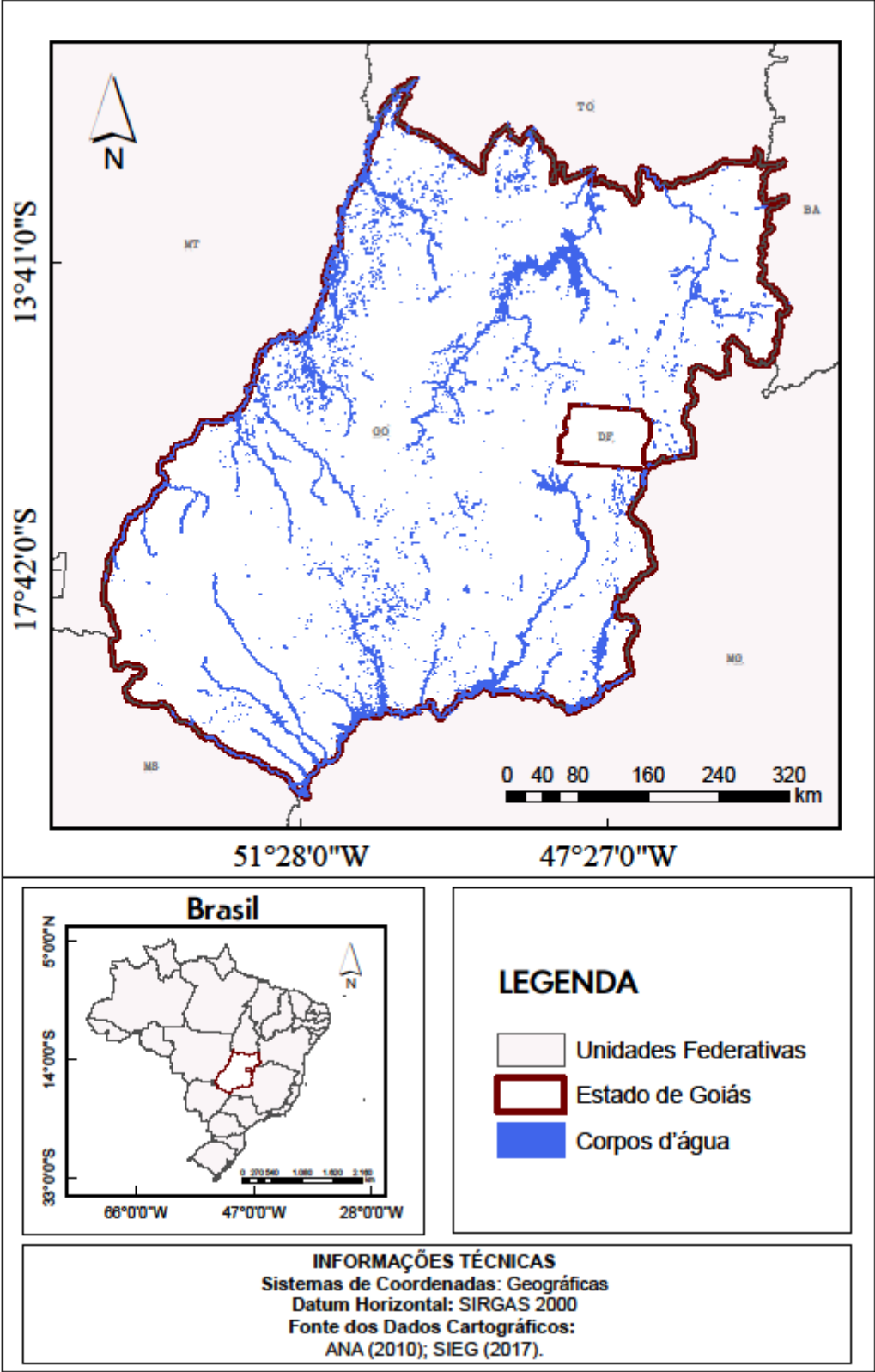


Fonte: A autora (2021).

4. **Corpos d'água** (incluem-se hidrografias - rios, lagos, aquicultura):

A aparência da hidrografia goiana é representada em azul escuro (Figura 8).

Figura 8 – Representação gráfica da variável restritiva “Corpos d’água” do fator criterial rede hidrográfica

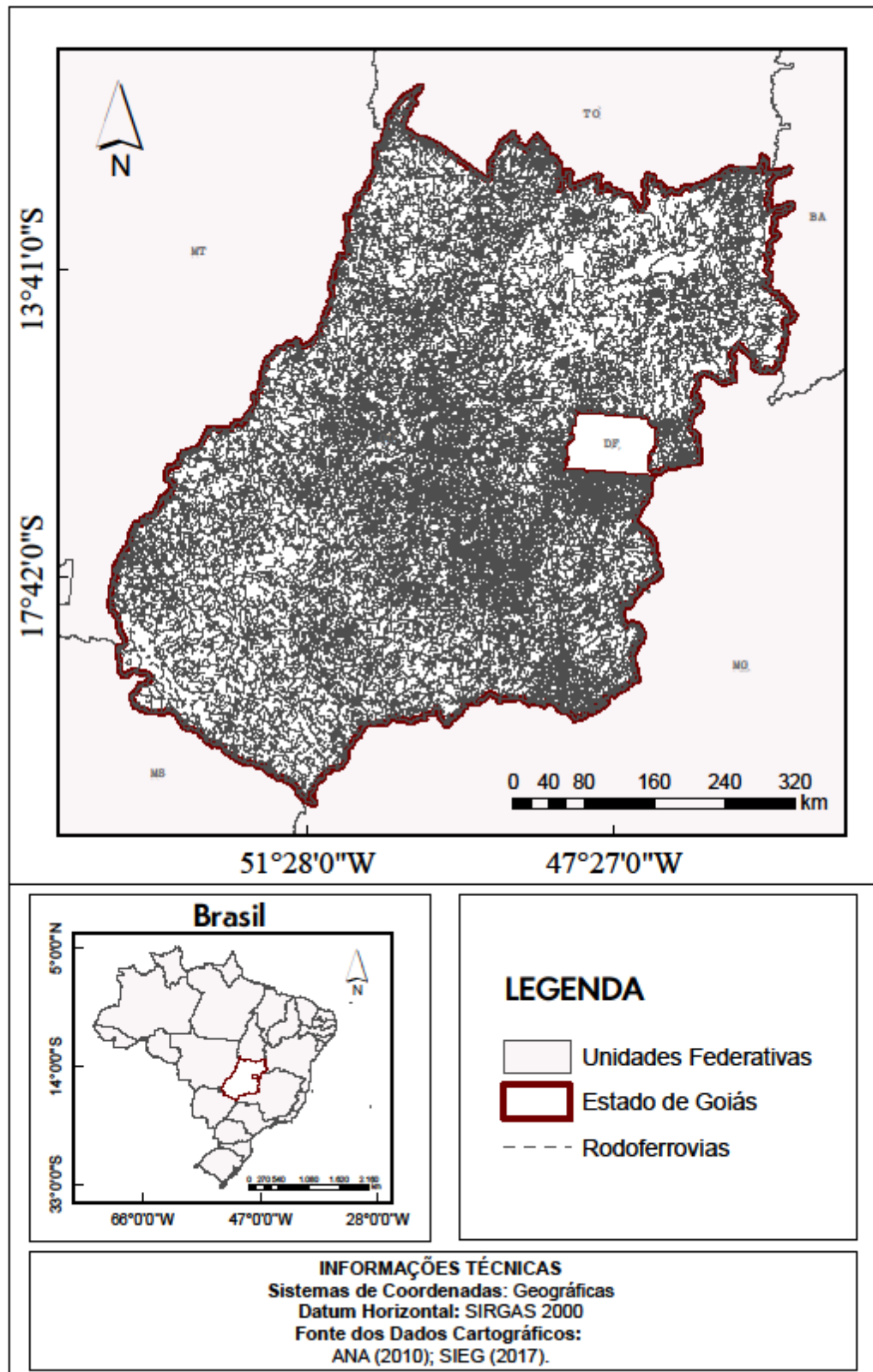


Fonte: A autora (2021).

5. Rodoferroviária (incluem-se rodovias e ferrovias):

A malha rodoferroviária de Goiás é representada em linhas cinzas escuras (Figura 9).

Figura 9 – Representação gráfica da variável restritiva “Rodoferroviária” do fator criterial trechos rodoviários e ferroviários

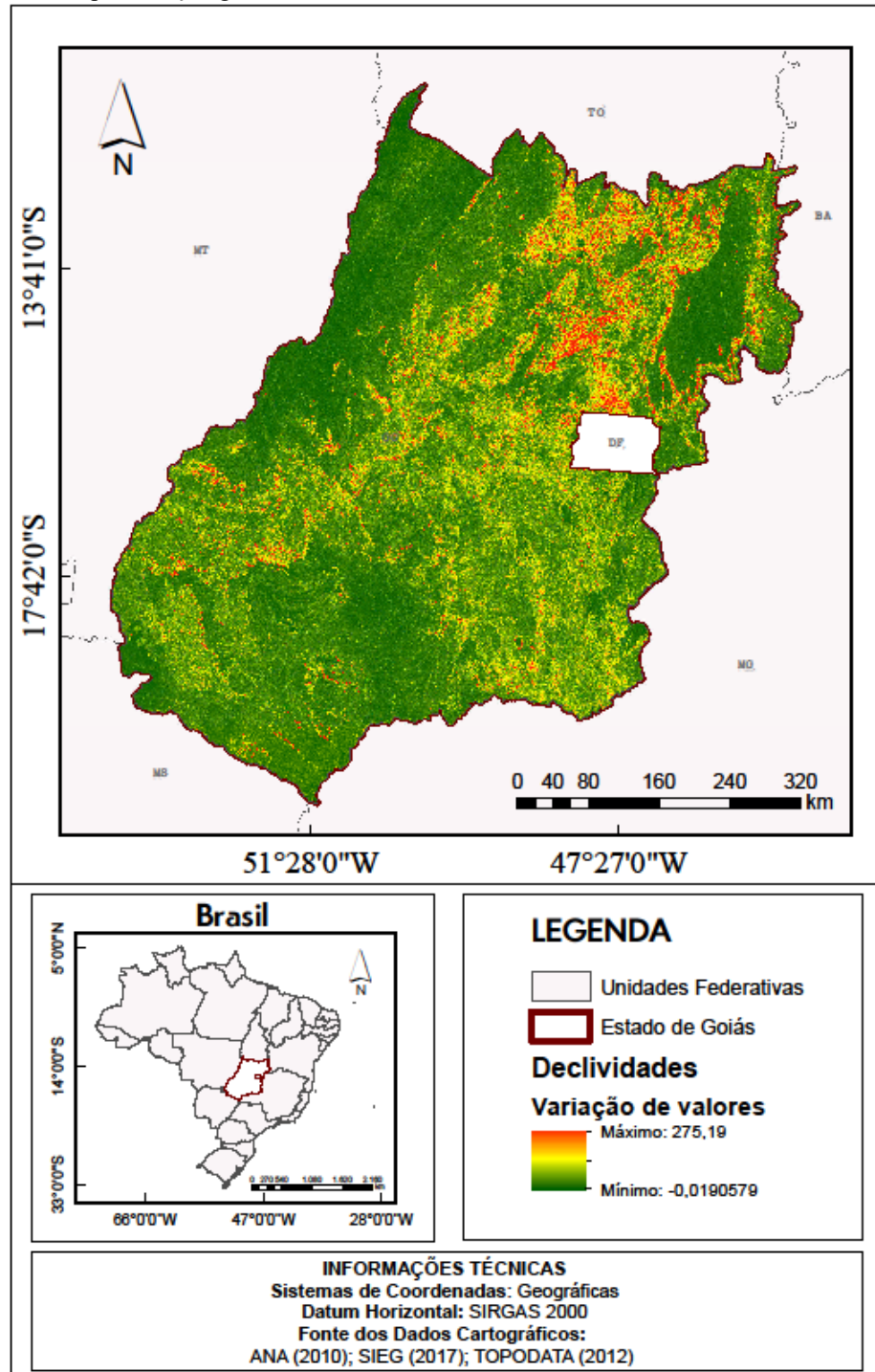


Fonte: A autora (2021).

6. Declividade (incluem-se as inclinações da superfície do terreno em relação à horizontal):

Na representação gráfica da declividade, os valores da inclinação do terreno goiano variam acompanhando os tons de cores entre o vermelho e o verde (Figura 10). Onde, os maiores valores de declividade estão representados em vermelho e os menores simulados em verde.

Figura 10 – Representação gráfica da variável restritiva “Declividade” do fator criterial declividades



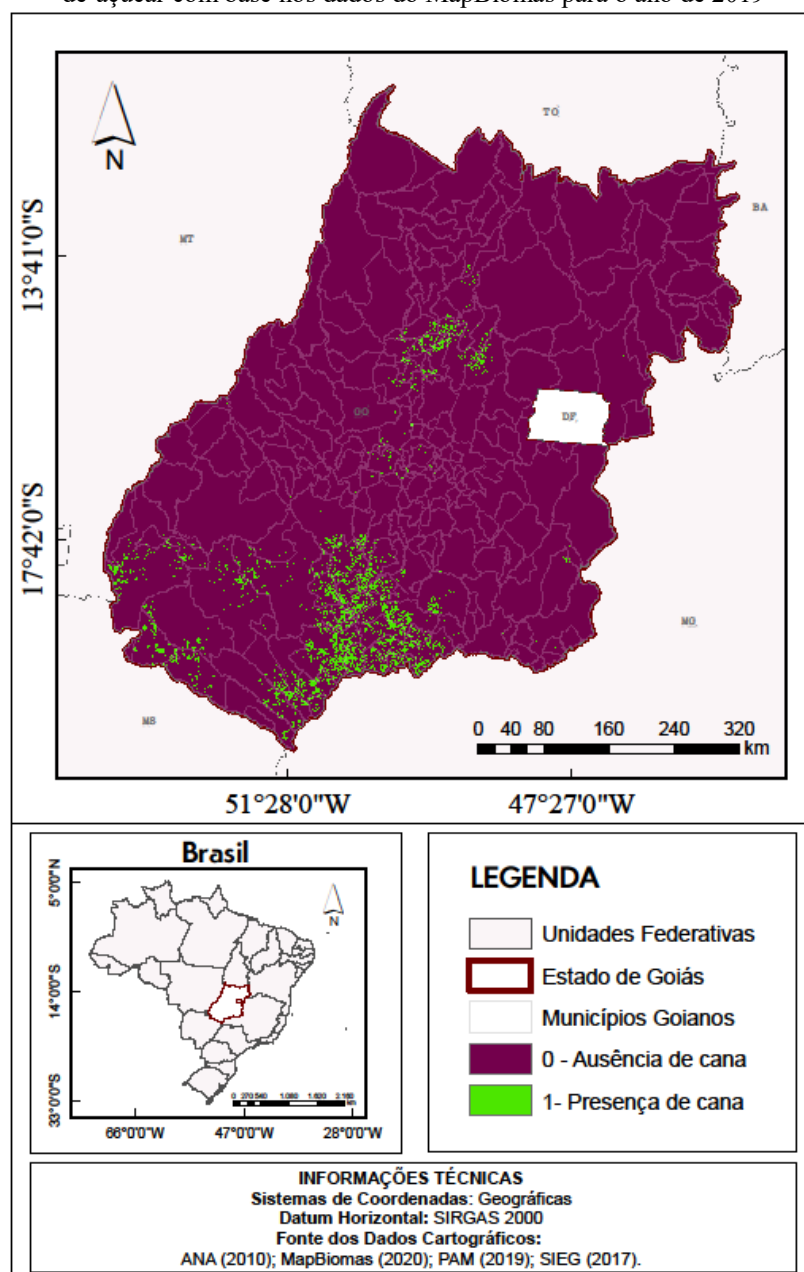
Fonte: A autora (2021).

5.1.2 Camadas favoráveis

E, as representações das variáveis preditivas favoráveis são mostradas a seguir:

1. Cana-de-açúcar (incluem-se as áreas de cana para produção de açúcar e álcool). A área em púrpura representa a expansão do estado de Goiás e as áreas em verde sinalizam a presença de cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira (Figura 11).
- 2.

Figura 11 – Representação gráfica da variável favorável “Cana-de-açúcar” do fator criterial referente às áreas produtivas de cana-de-açúcar do estado de Goiás. O valor 0 (zero) indica a ausência e 1(um) a presença de cana-de-açúcar com base nos dados do MapBiomas para o ano de 2019

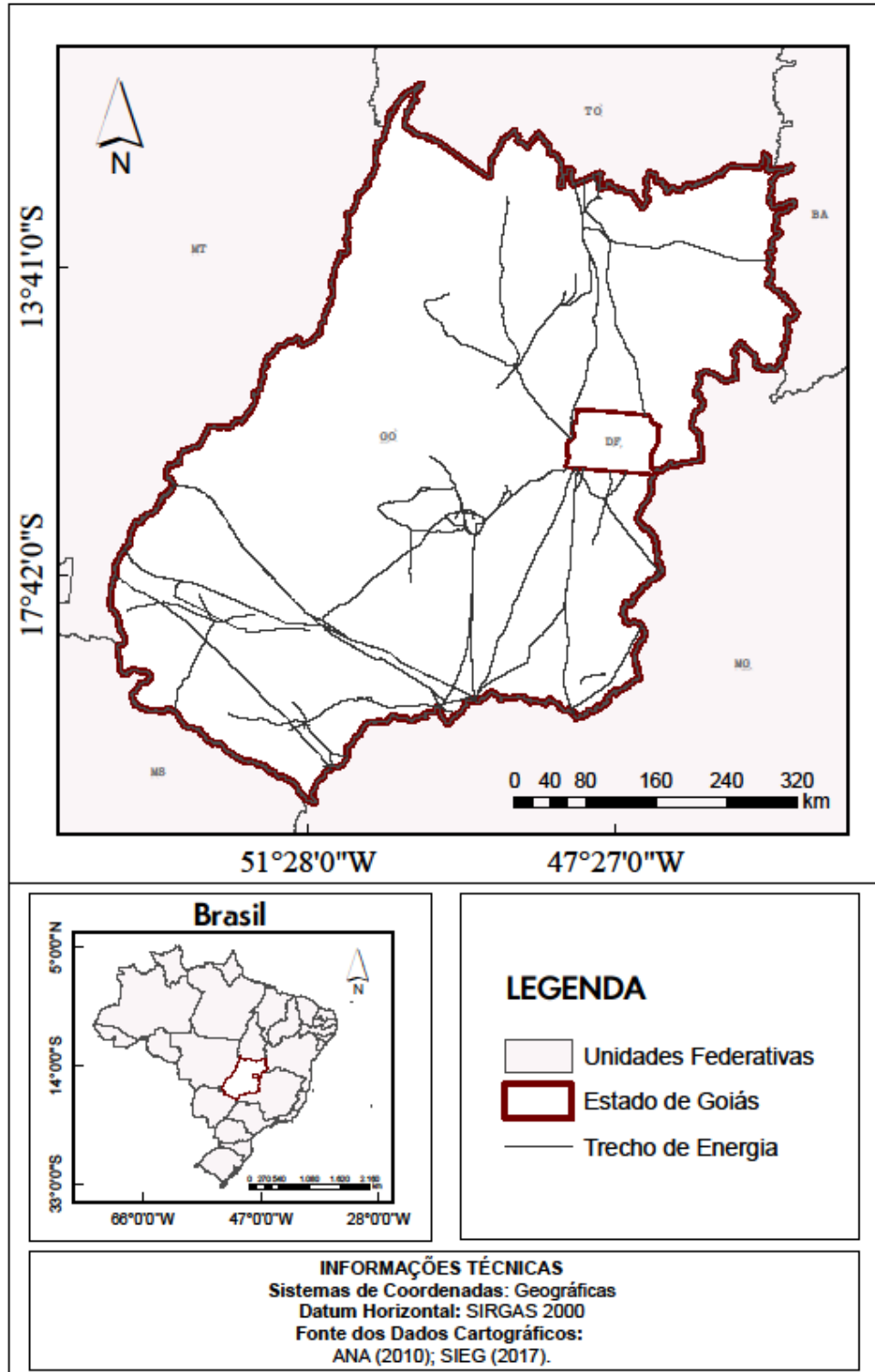


Fonte: A autora (2021).

3. Trecho de energia (incluem-se as redes de energia existentes):

As linhas cinzas escuras mostram as sinuosidades da rede de transmissão de energia elétrica em Goiás (Figura 12).

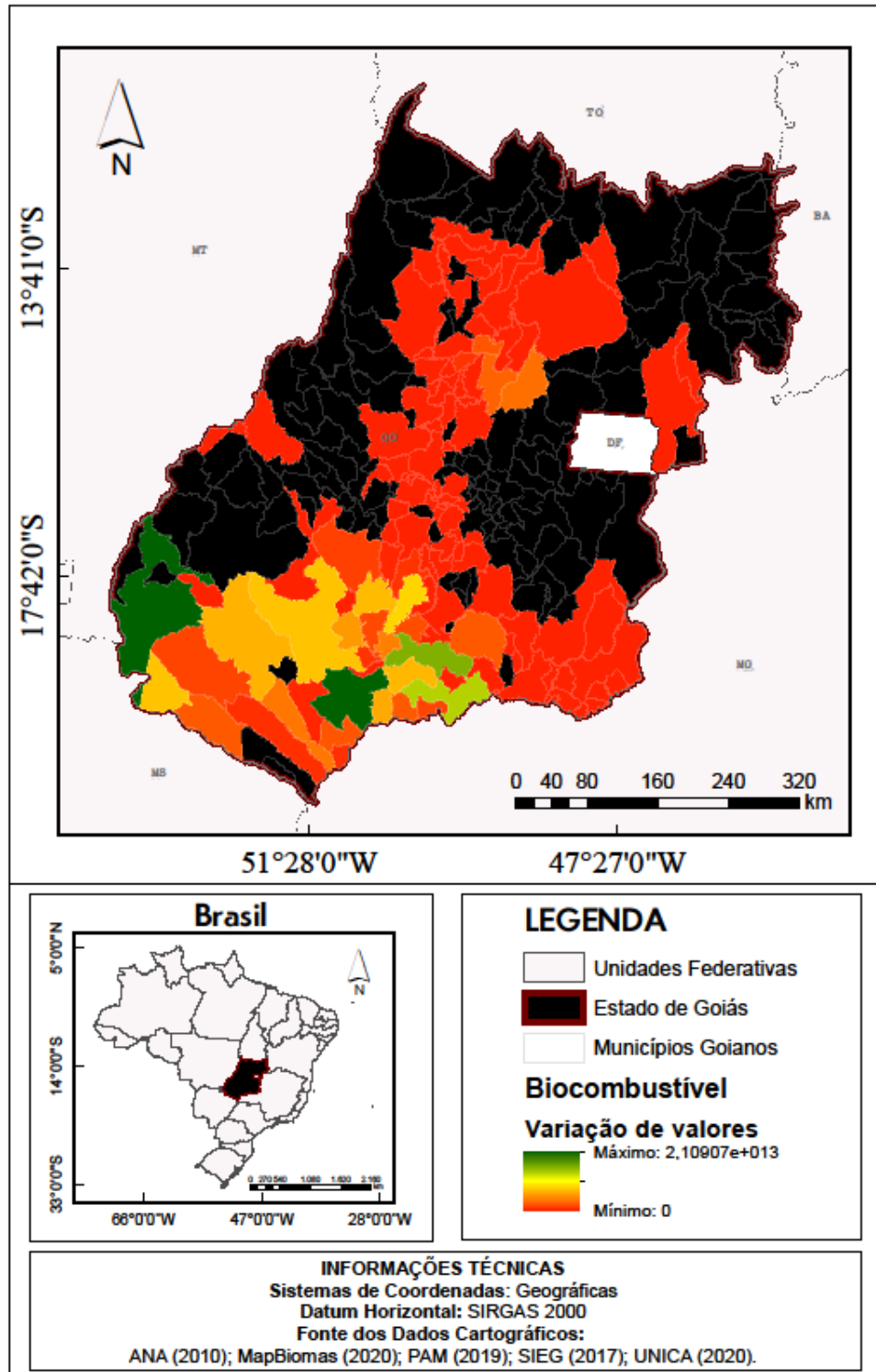
Figura 12 – Representação gráfica da variável favorável “Trecho de energia” do fator criterial trechos de energia



Fonte: A autora (2021).

4. Biocombustível (inclui-se a produtividade do biogás oriundo do bagaço, da vinhaça, da torta de filtro, das palhas e das pontas; todos obtidos por causa do processo de produção de açúcar e álcool) (Figura 13);

Figura 13 – Representação gráfica da variável restritiva “Biocombustível” do fator criterial produção de biocombustível



Fonte: A autora (2021).

Em preto estão representadas as localidades do estado de Goiás onde não há produção de biogás e a variação de cores entre o vermelho e o verde mostra a disponibilidade calculada de biocombustível (Figura 13), onde, valores mais baixos são pertencentes às áreas em vermelho e valores mais altos pertencem às áreas em tons verdes, a variação de tonalidade entre o vermelho e o verde representam também as variações de quantidades de biocombustível.

5. Transporte (incluem-se rodovias e ferrovias, áreas de transporte de biomassa):

A camada foi a mesma usada no item restritivo (Figura 9).

5.2 Camadas *fuzzy* das variáveis

Foi aplicada a lógica *fuzzy*, considerando todos os parâmetros estabelecidos na metodologia do item 4.2.4, para todas as variáveis.

Para todos os *layers* simulados (seis restritivos e quatro favoráveis) os dados *fuzzy* variam de 0 (zero) a 1 (um) , aqui representados por variações de cores entre o vermelho e o verde, respectivamente, correspondendo aos locais onde poderão ou não ser instaladas as usinas de biocombustível, sendo os locais em vermelho não propícios a instalação e os locais em verde promissores. A variação entre as cores vermelha e verde representa a escala de adequabilidade das variáveis preditivas consideradas para cada camada.

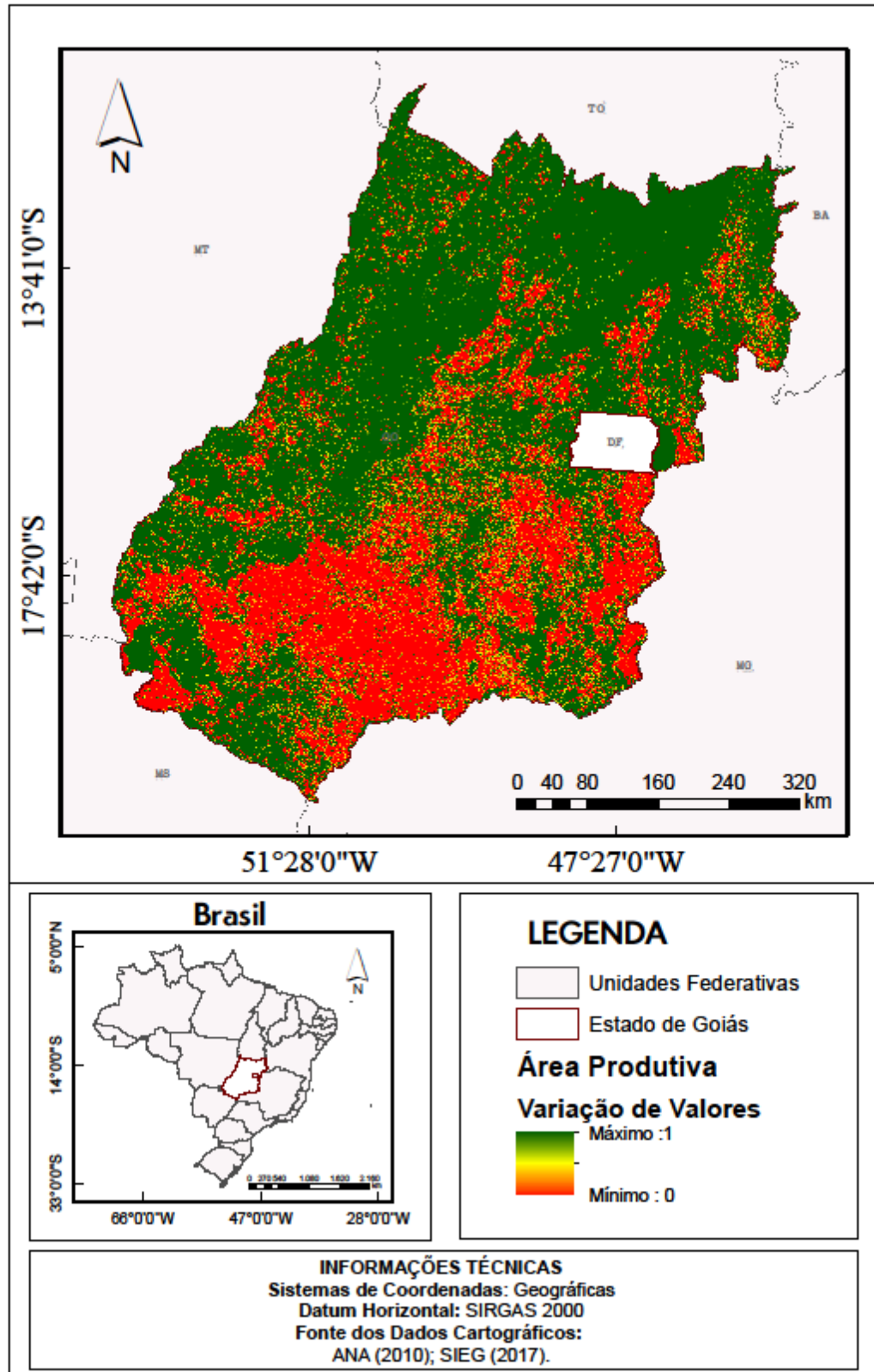
5.2.1 Camadas restritivas

Com base na distância euclidiana das áreas produtivas (Figura 14), áreas protegidas (Figura 15), área urbana (Figura 16), hidrografia (Figura 17), rede rodoviária (Figura 18) e por fim do dado de declividade (Figura 19), foi aplicada a função linear *fuzzy* de restrição correspondente para cada variável.

As representações gráficas das fuzzificações das variáveis estabelecidas como preditivas restritivas são mostradas na sequência:

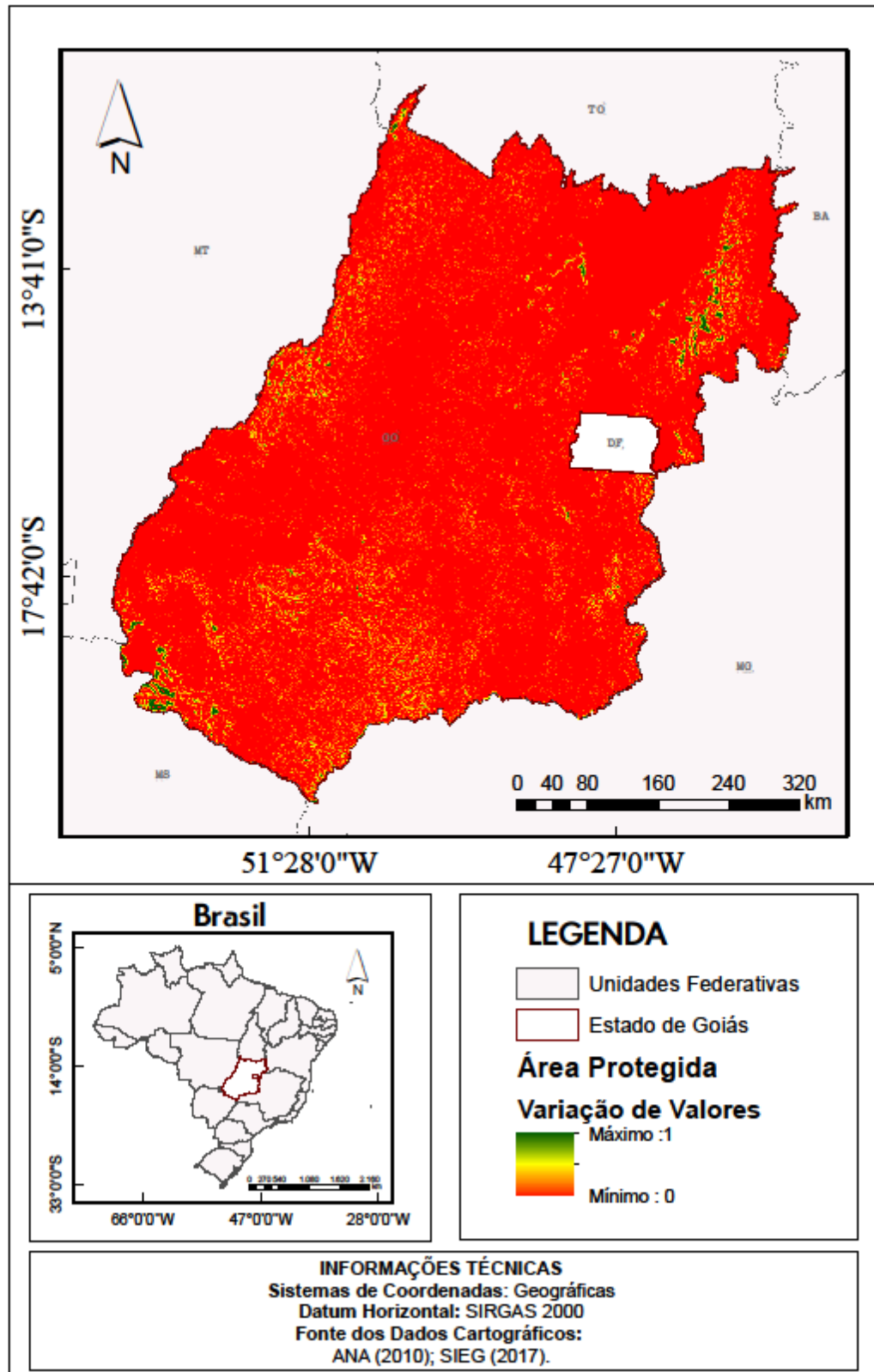
1. Área produtiva:

Figura 14 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Área produtiva”



Fonte: A autora (2021).

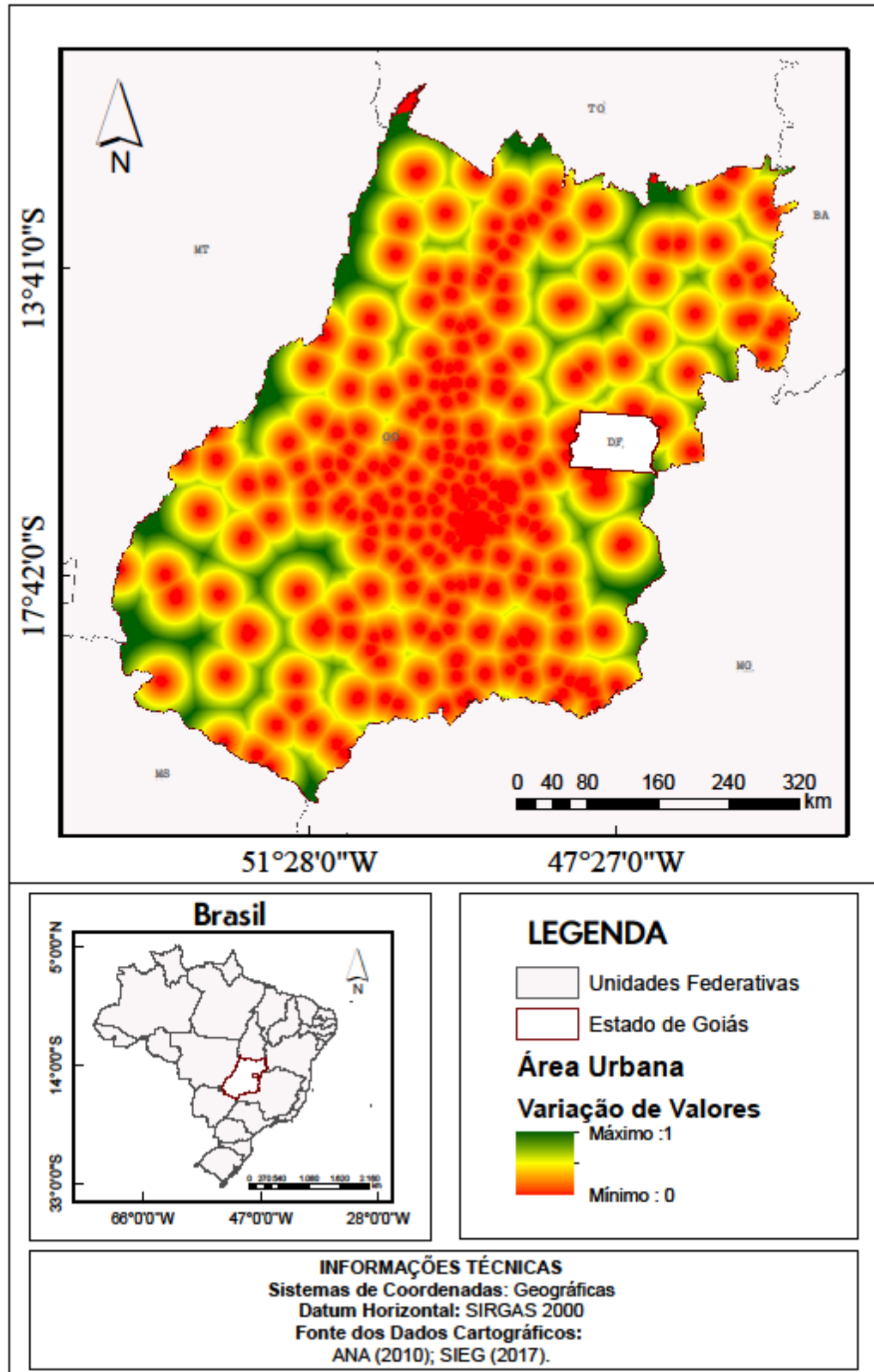
2. Área protegida:

Figura 15 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Área protegida”

Fonte: A autora (2021).

3. Área urbana:

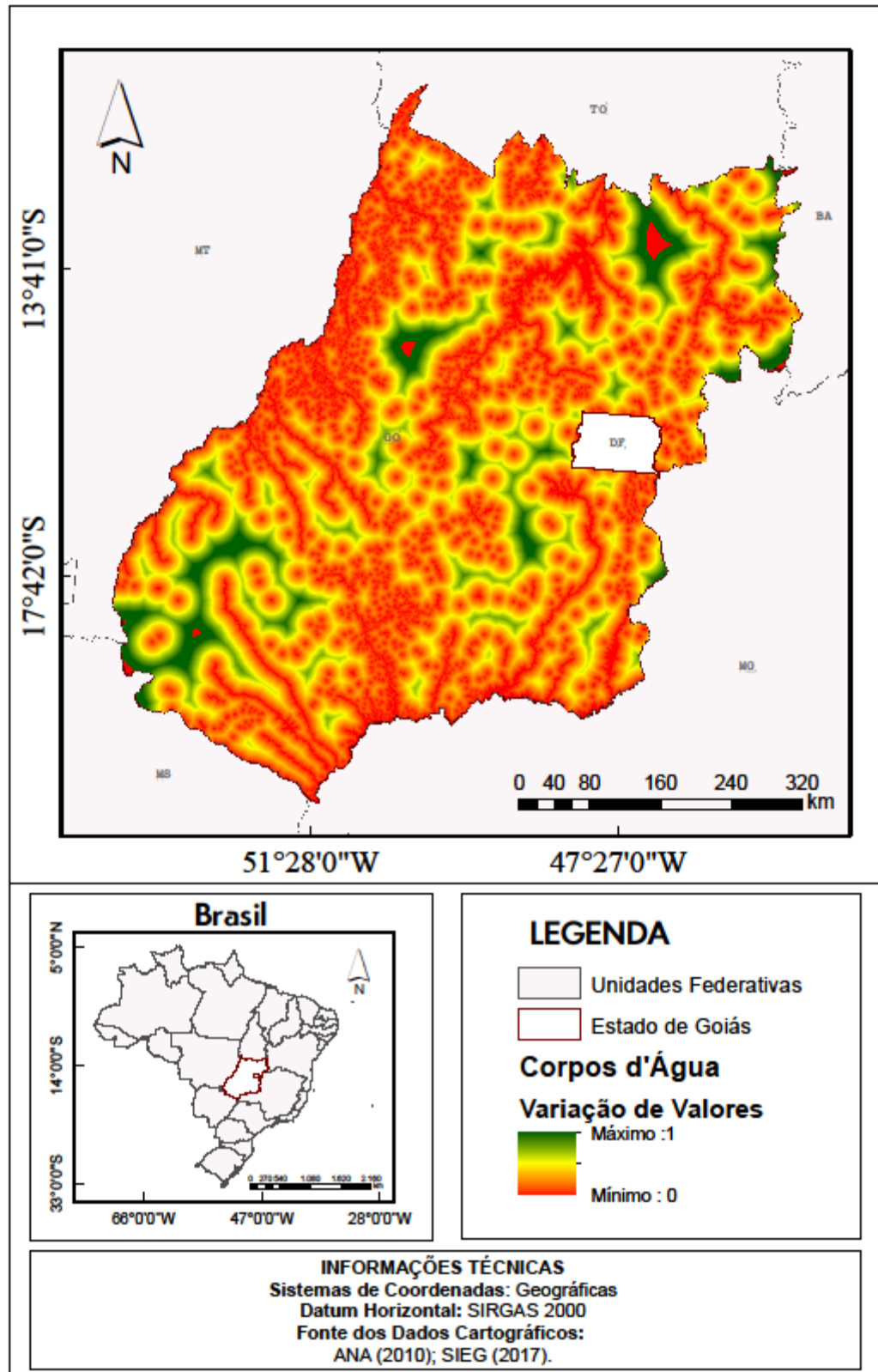
Figura 16 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Área urbana”



Fonte: A autora (2021).

4. Corpos d'água:

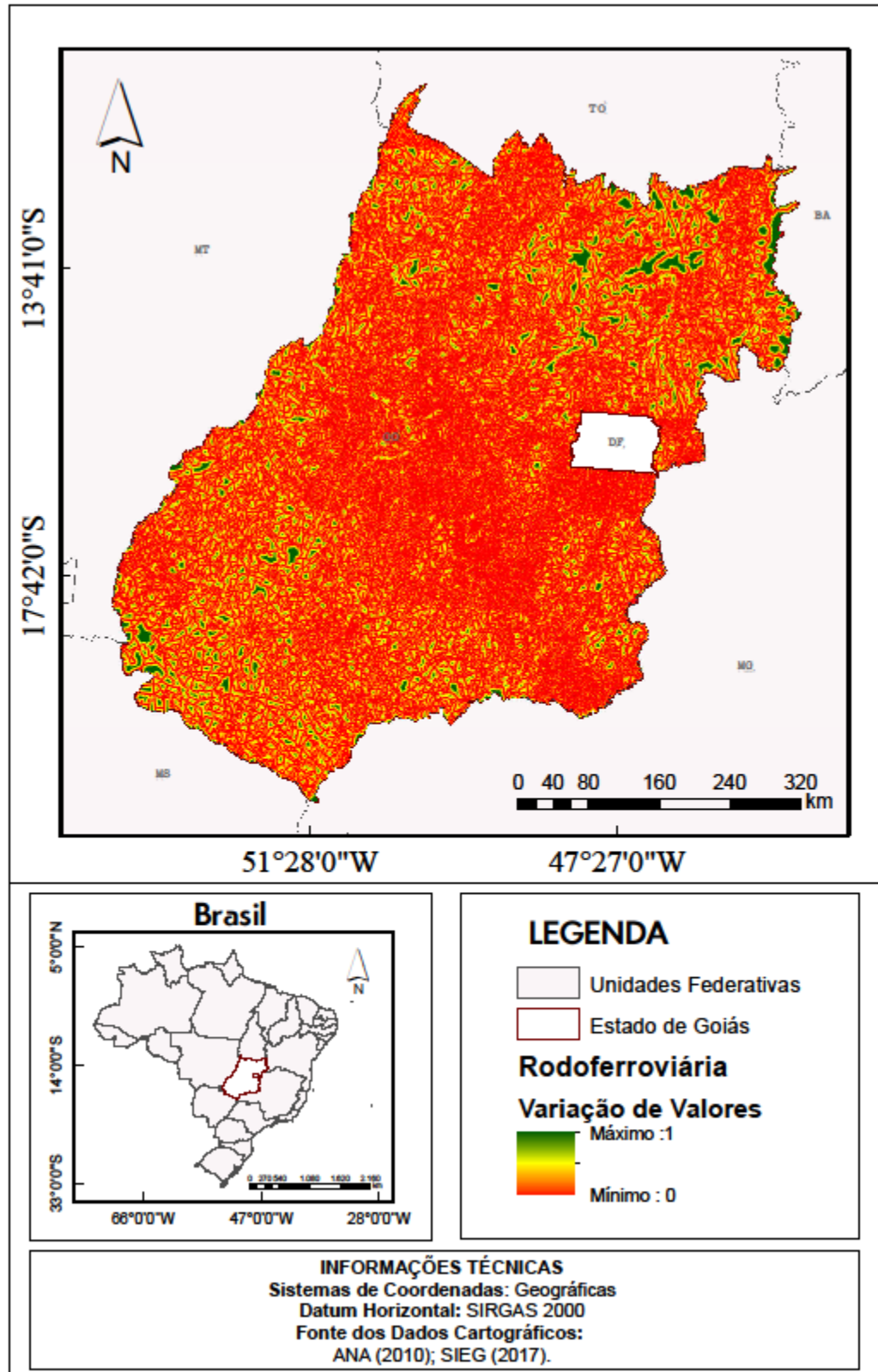
Figura 17 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Corpos d'água”



Fonte: A autora (2021).

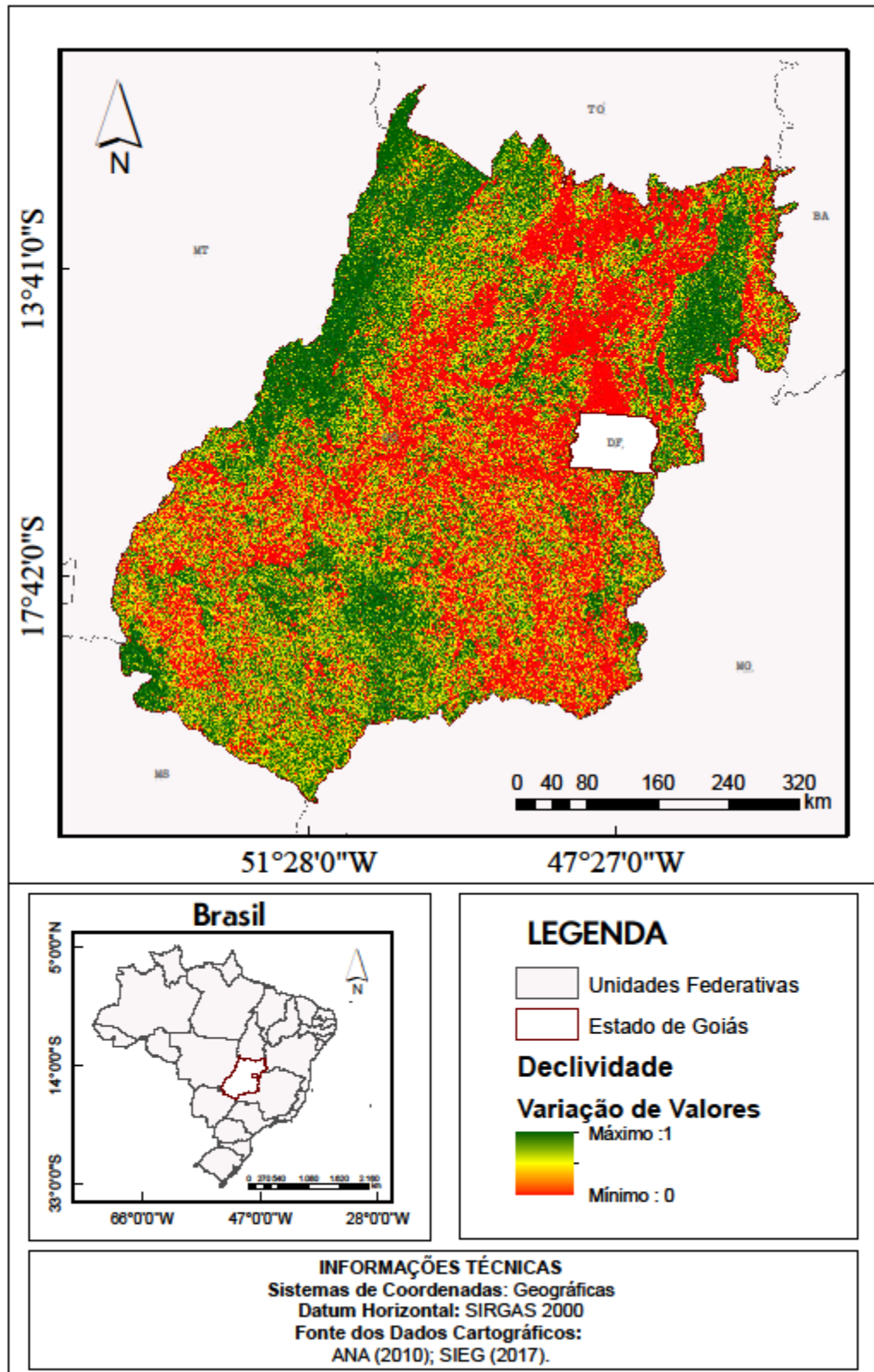
5. Rodoferroviária:

Figura 18 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Rodoferroviária”



Fonte: A autora (2021).

6. Declividade:

Figura 19 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável restritiva “Declividade”

Fonte: A autora (2021).

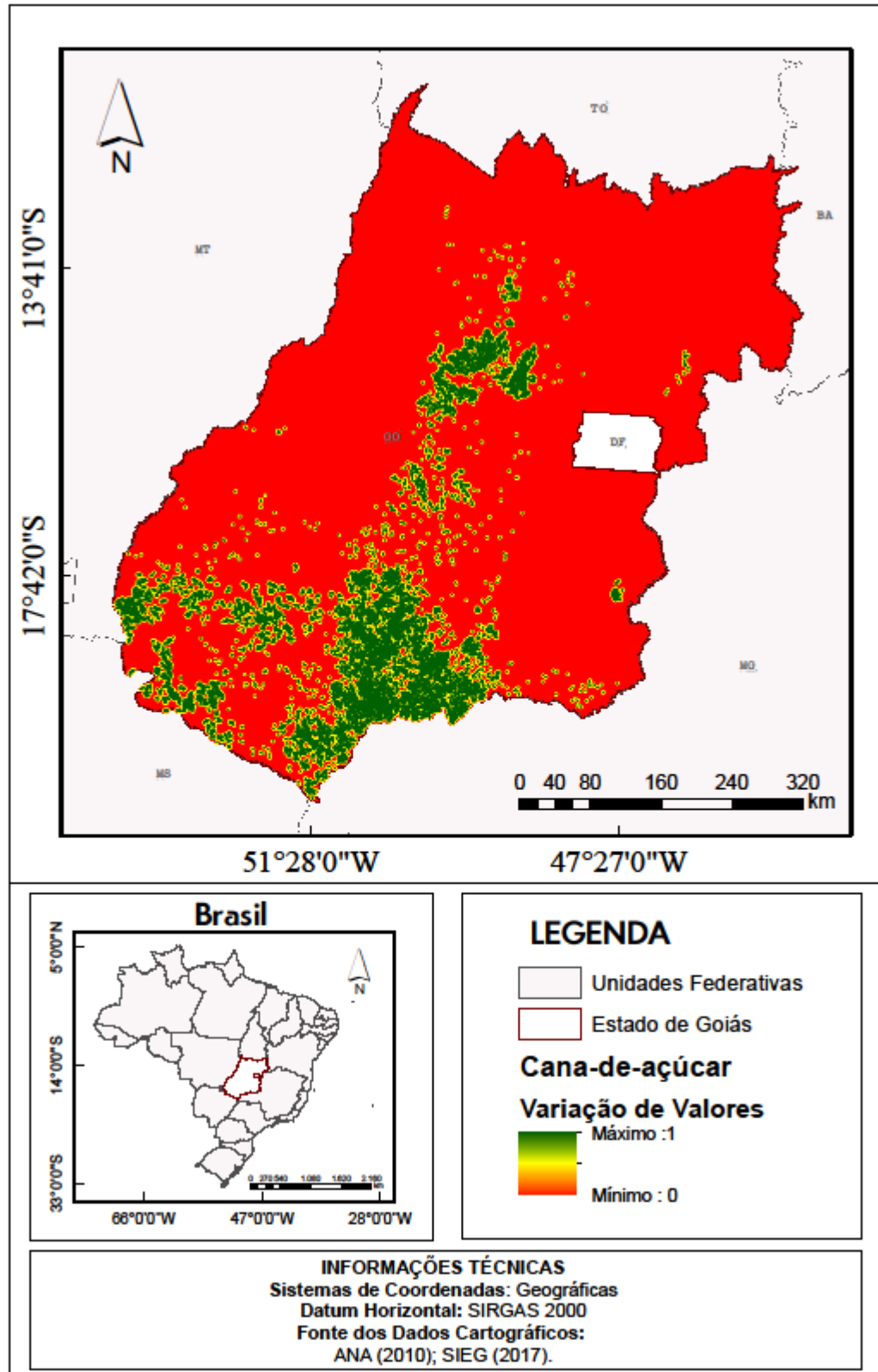
5.2.2 Camadas favoráveis

Em relação às quatro camadas favoráveis para a instalação de usinas de biogás de cana-de-açúcar, considerou-se a distância euclidiana das áreas produtoras de cana (Figura 20), das linhas de transmissão de energia elétrica (Figura 21), do potencial de produção de biocombustível por município (Figura 22) e da (proximidade) com as linhas de transporte rodoferroviário (Figura 23).

E, as representações gráficas das variáveis instituídas como preditivas favoráveis que tiveram a aplicação da lógica *fuzzy* são:

1. Cana-de-açúcar:

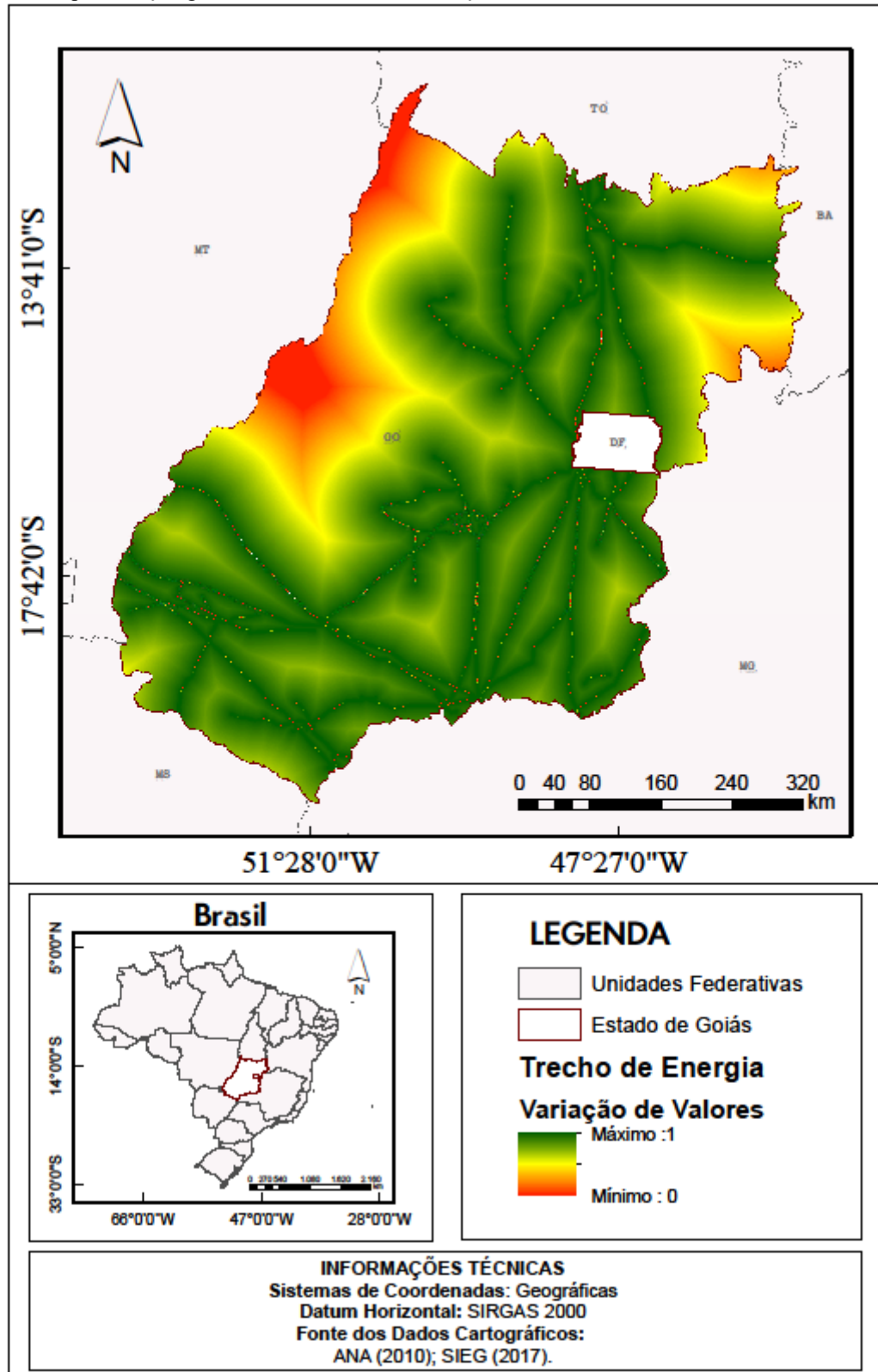
Figura 20 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Cana-de-açúcar”



Fonte: A autora (2021).

2. Trecho de energia:

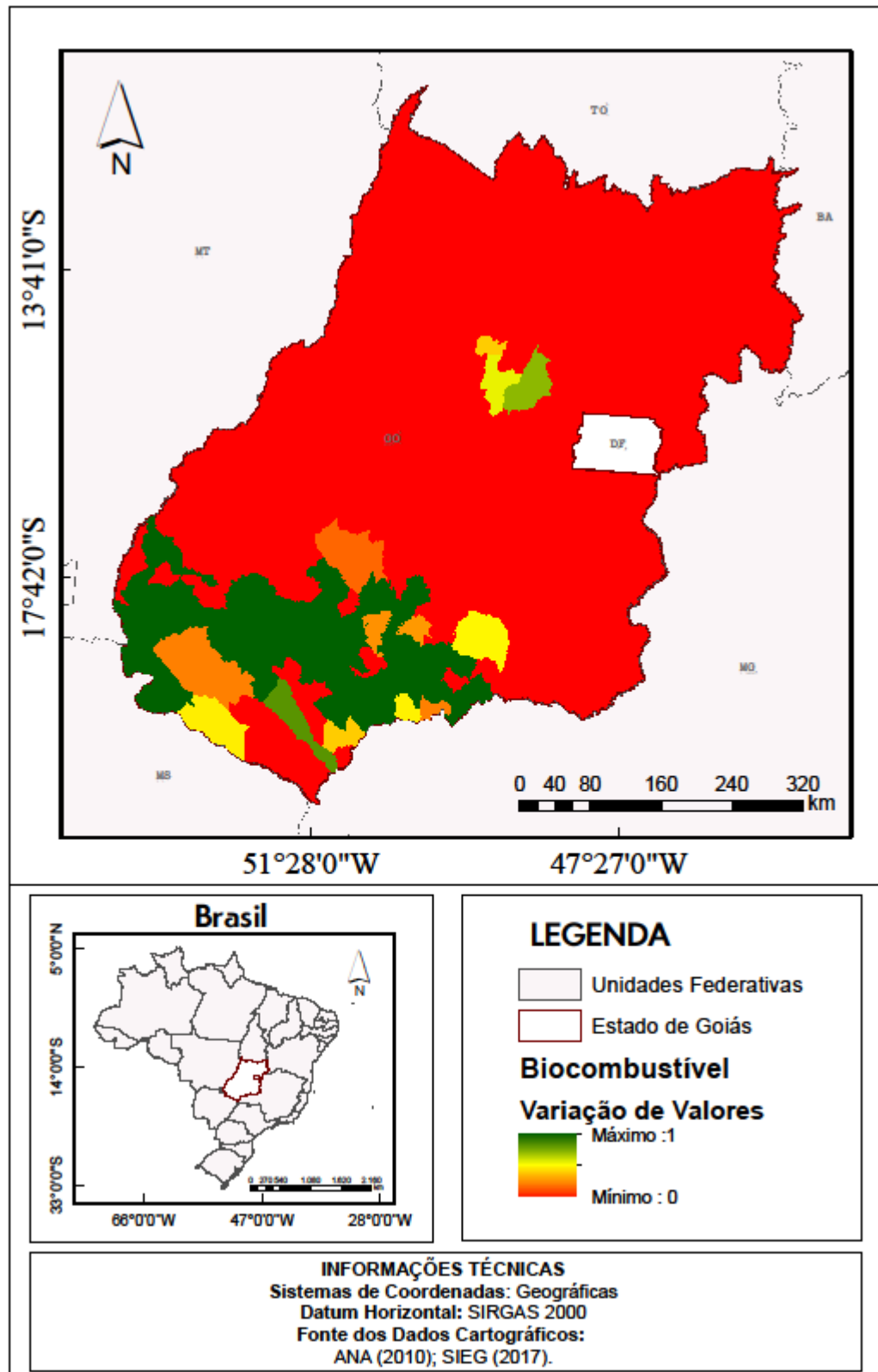
Figura 21 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Trecho de energia”



Fonte: A autora (2021).

3. Biocombustível

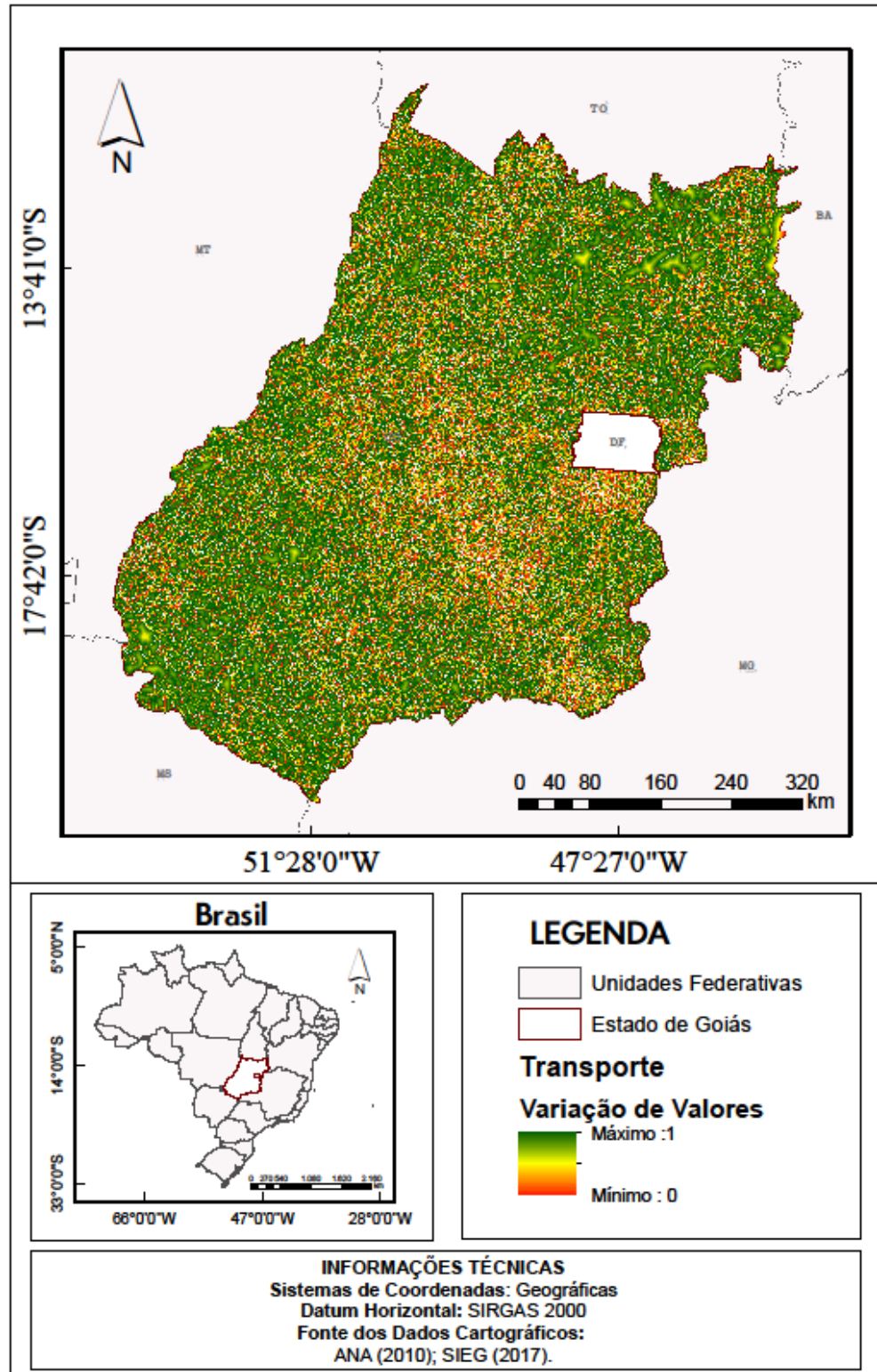
Figura 22 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Biocombustível”



Fonte: A autora (2021).

4. Transporte:

Figura 23 – Representação gráfica da camada de fuzzificação referente à variável favorável “Transporte”



Fonte: A autora (2021).

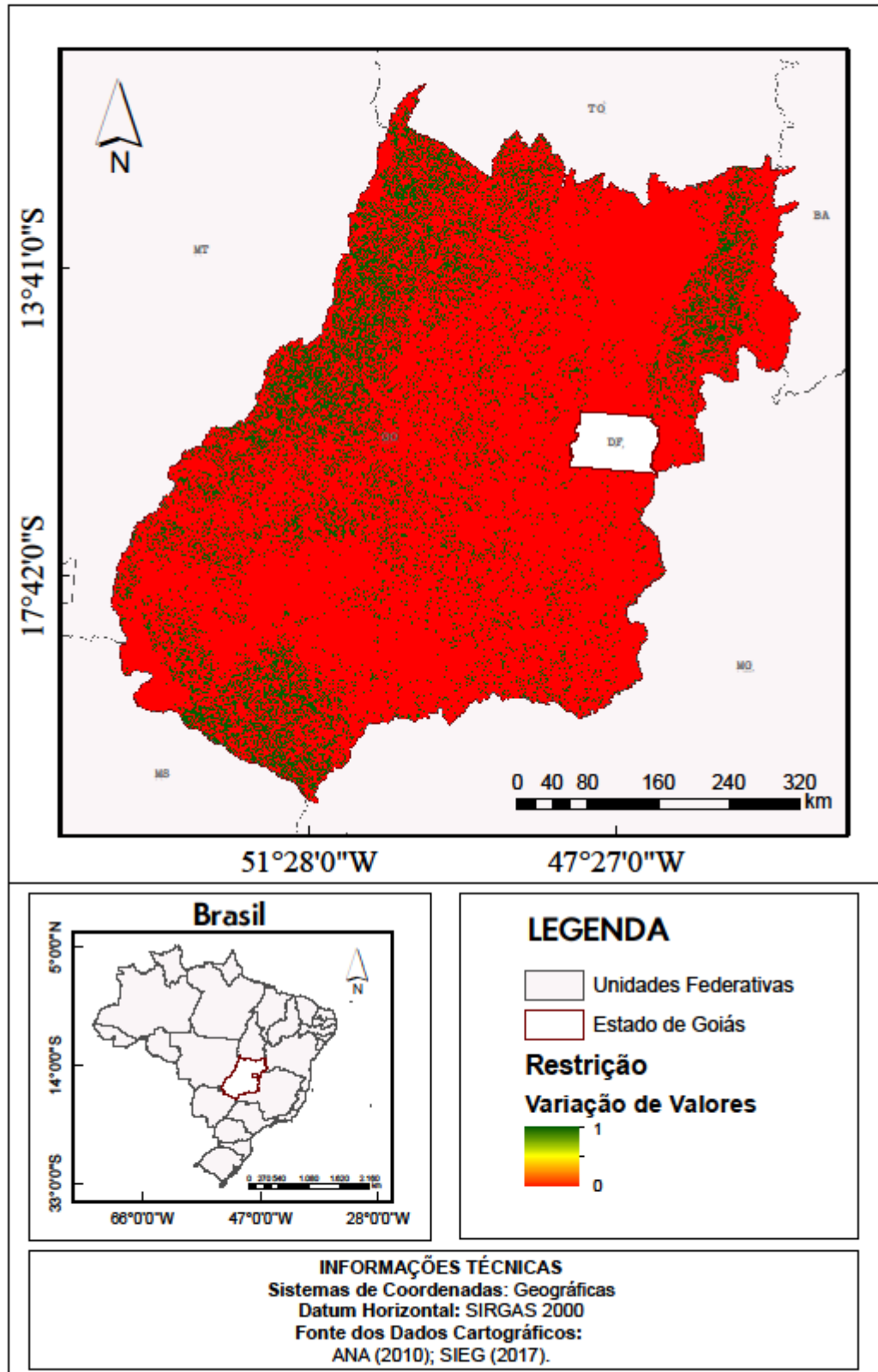
5.3 Camadas finais

A operação *AND* das 6 (seis) camadas preditivas restritivas gerou uma única camada de restrição (Figura 24), esta camada e as outras 4 (quatro) fuzzificadas favoráveis (Figuras 20 a 23) foram ponderadas com os pesos do AHP advindos do trabalho do Ioannou *et al.* (2018) (Tabela 2) resultando no *raster* representado pela Figura 25; depois esta camada do AHP (Figura 25) foi multiplicada pela camada *AND fuzzy* (Figura 26), camada esta que foi gerada pelo operador *AND* entre: a camada final restritiva (Figura 24), a camada favorável de distância “Cana-de-açúcar” (Figura 20) e a camada favorável “Transporte” (Figura 23).

A multiplicação do resultado do AHP (Figura 25) pela camada *AND fuzzy* (Figura 26) deu origem ao *raster* final (Figura 27), apontando os lugares menos e mais apropriados à disposição de biodigestores para o estado de Goiás. As áreas em tons de verde são as consideradas mais adequadas para a instalação das usinas de produção de energia de biomassa, enquanto as em tons de amarelo são menos adequadas e as em tons de vermelho não são adequadas. Foram criados 5 (cinco) níveis de intervalos para a adequação de instalação, com base no resultado das funções de associação *fuzzy*, a saber: inadequado (0 - 0,2), péssimo (0,2 - 0,4), ruim (0,4 - 0,5), bom (0,6 - 0,8) e excelente (0,8 - 1). Este resultado também pode ser visualizado em um *webmap* no seguinte endereço: <https://geoifg.github.io/marlisia/>.

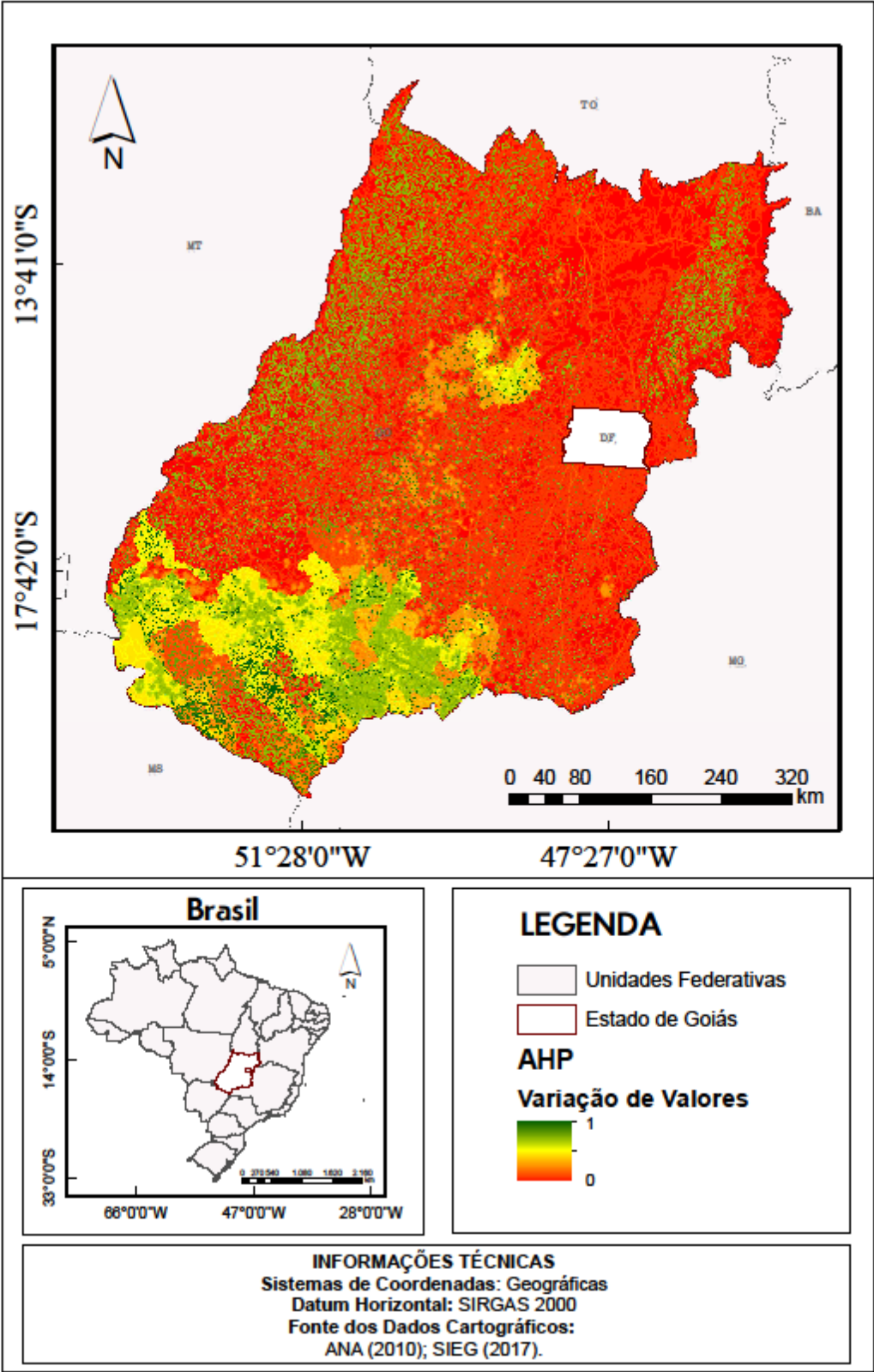
A seguir as camadas finais podem ser observadas:

Figura 24 – Camada matricial de restrição final da operação *AND*



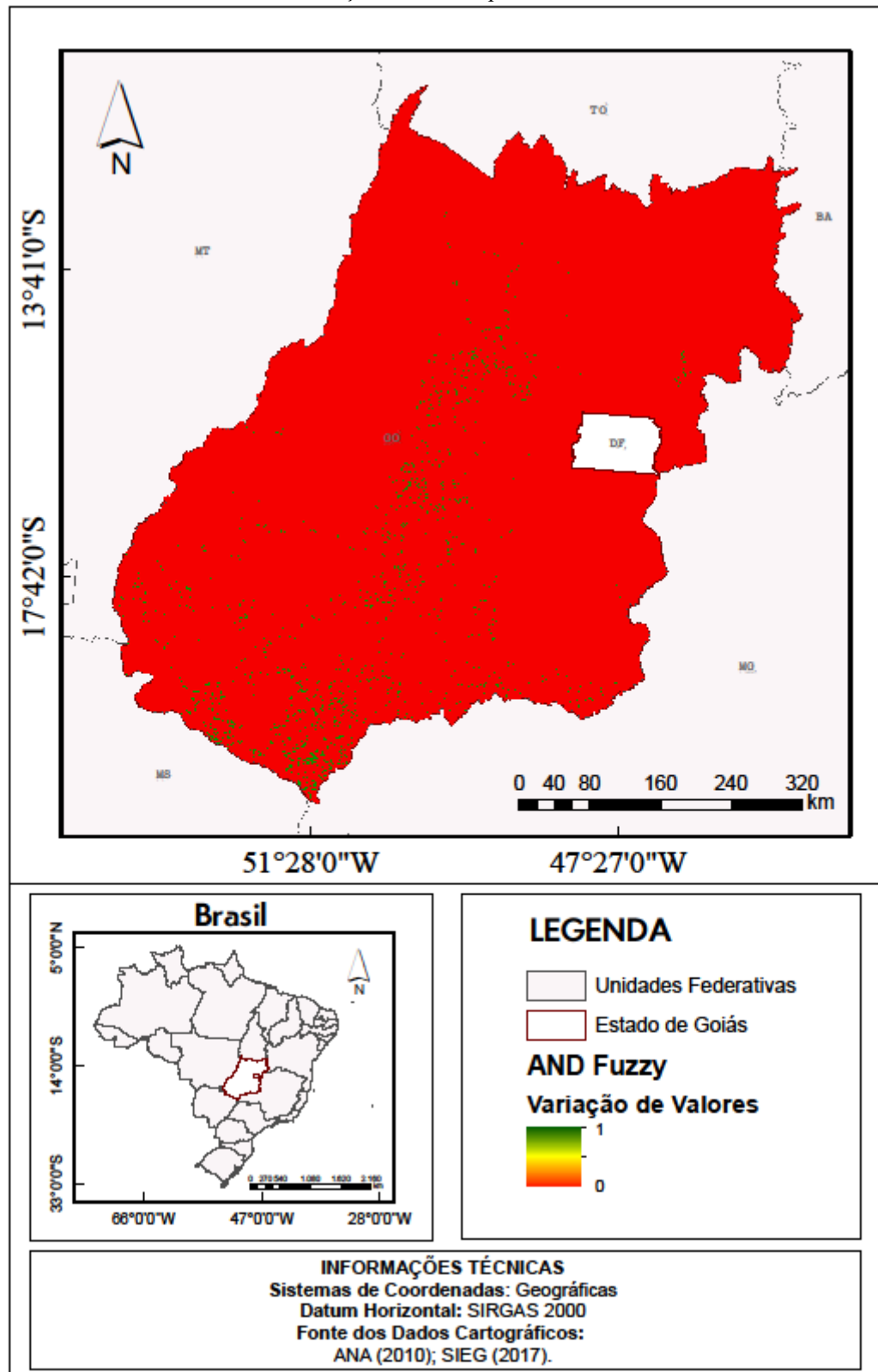
Fonte: A autora (2021).

Figura 25 – Camada matricial resultado do AHP



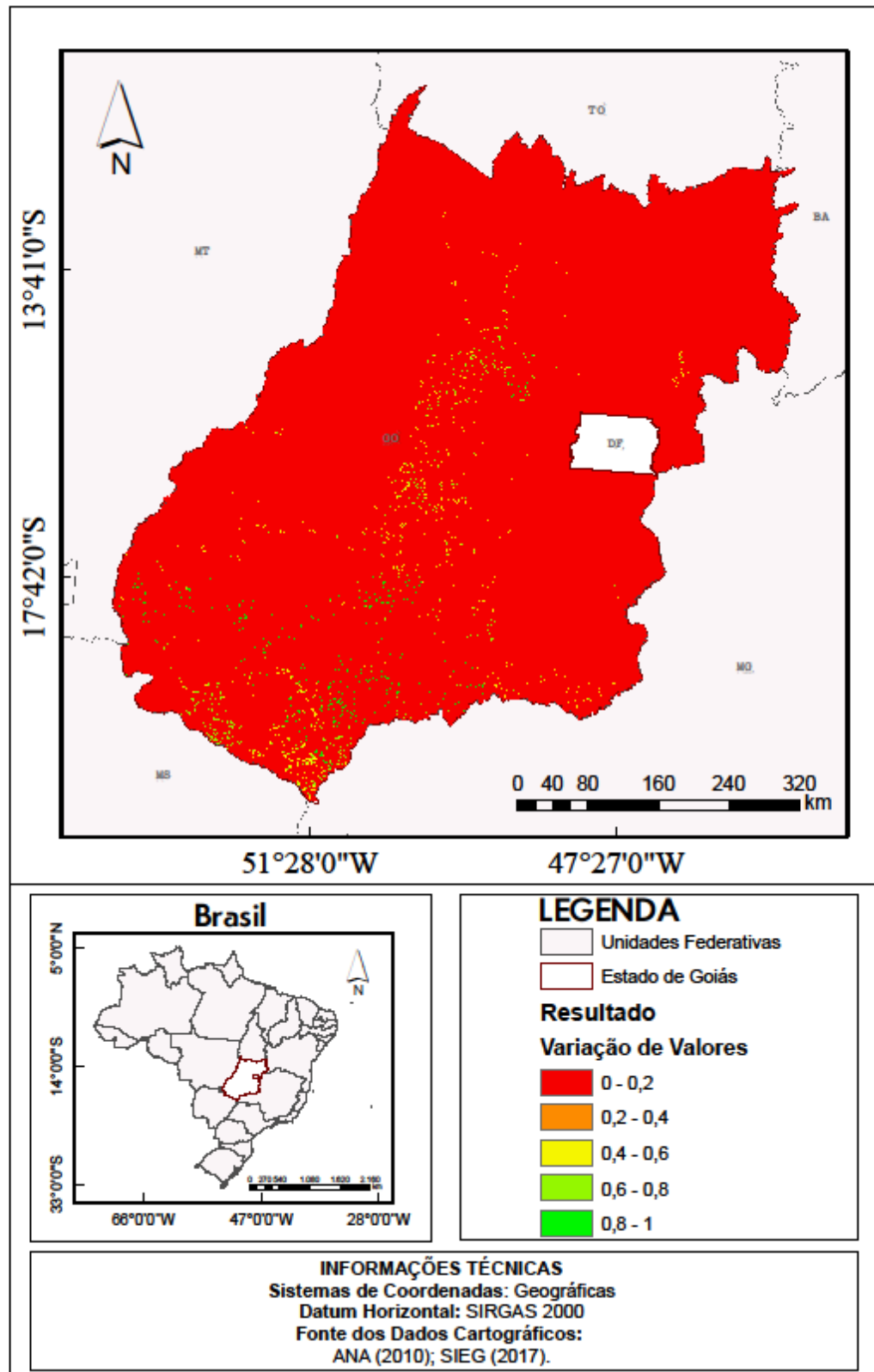
Fonte: A autora (2021).

Figura 26 – Camada matricial resultado da operação *AND* entre as camadas favoráveis de distância “Cana-de-açúcar” e “Transporte”



Fonte: A autora (2021).

Figura 27 – Camada matricial final, resultado da multiplicação da camada *AND fuzzy* pela camada resultado do AHP



Fonte: A autora (2021).

5.4 Potencial de biogás

Dos 246 municípios do estado de Goiás, sendo 115 produtores de cana-de-açúcar para indústrias sucroalcooleiras, foram apontadas 17 (dezessete) localidades (urbes) com potencial para instalação de usinas de biomassa, nível 0,8 – 1, totalizando uma área de 49001 Km². Estes municípios estão representados em verde na Figura 28.

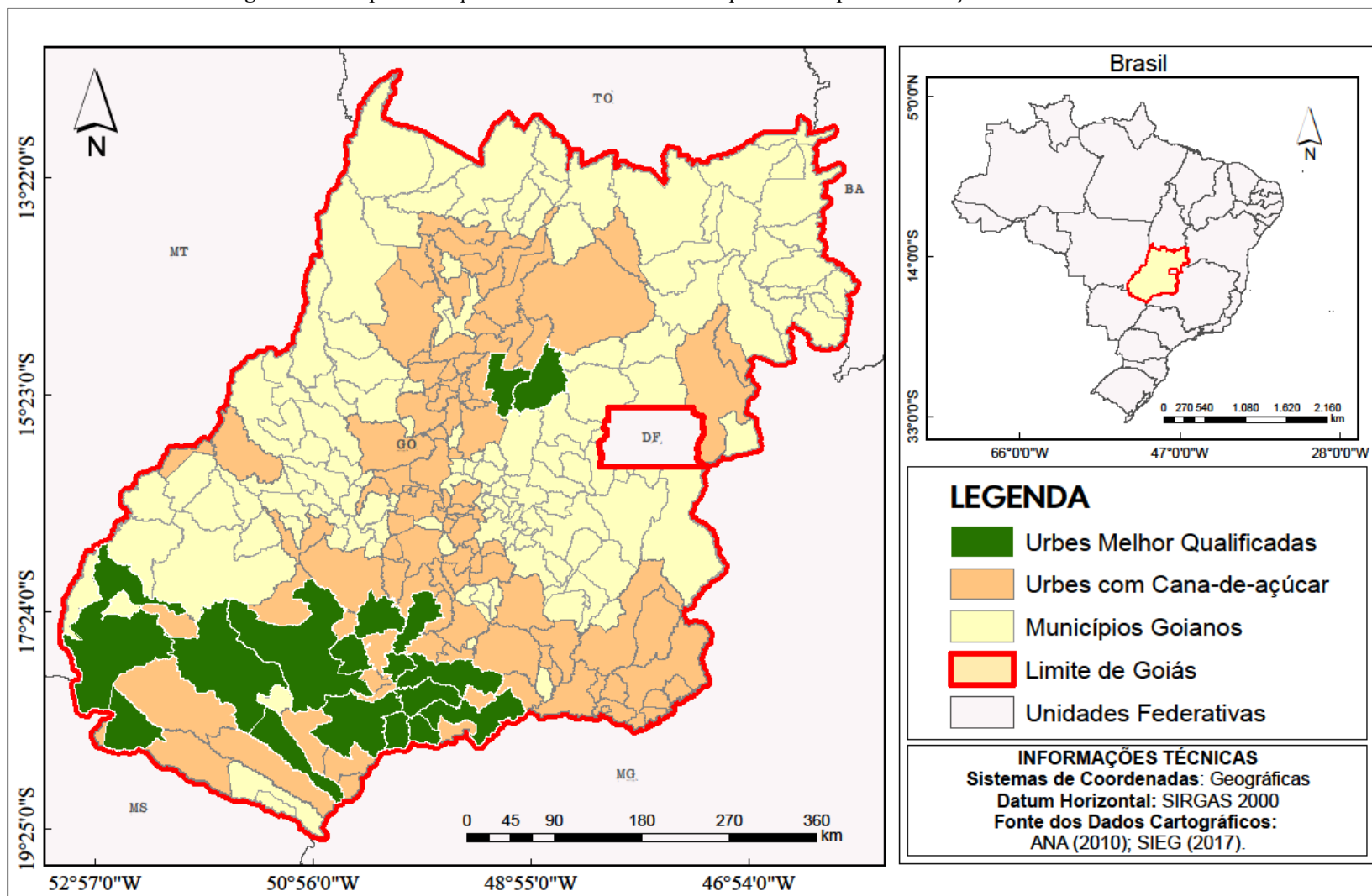
Após o resultado de álgebra de mapas foram estimados os potenciais de biomassa para cada uma das 17 (dezessete) localidades melhor classificadas, nível 0,8 – 1 (Figura 28). A Tabela 3 mostra a quantificação por urbe da produção de cana-de-açúcar e a respectiva estimativa de produção de biogás (bagaço, vinhaça, torta de filtro, palhas e pontas; todos obtidos por causa do processo de produção de açúcar e álcool) para o ano de 2019.

Tabela 3 – Cidades classificadas com pontuação nível 0,8 – 1

Cidade	Cana (t)	Biogás (Nm ³ •ano ⁻¹)
Acreúna	2,16 x 10 ⁶	3,89 x 10 ¹²
Bom Jesus de Goiás	2,54 x 10 ⁶	3,81 x 10 ¹²
Caçu	1,63 x 10 ⁶	2,07 x 10 ¹²
Chapadão do Céu	3,03 x 10 ⁶	4,16 x 10 ¹²
Edéia	2,72 x 10 ⁶	4,62 x 10 ¹²
Goianésia	1,53 x 10 ⁶	1,57 x 10 ¹²
Goiatuba	3,49 x 10 ⁶	8,34 x 10 ¹²
Gouvelândia	2,36 x 10 ⁶	3,45 x 10 ¹²
Inaciolândia	1,57 x 10 ⁶	1,42 x 10 ¹²
Itumbiara	3,41 x 10 ⁶	7,23 x 10 ¹²
Jataí	3,00 x 10 ⁶	3,75 x 10 ¹²
Mineiros	4,50 x 10 ⁶	1,13 x 10 ¹³
Porteirão	2,08 x 10 ⁶	2,40 x 10 ¹²
Quirinópolis	5,94 x 10 ⁶	2,11 x 10 ¹³
Rio Verde	2,52 x 10 ⁶	4,16 x 10 ¹²
Santa Helena de Goiás	2,30 x 10 ⁶	2,99 x 10 ¹²
Vila Propício	1,74 x 10 ⁶	1,87 x 10 ¹²

Fonte: PAM (2019), cana-de-açúcar. A autora (2021), estimativa de biogás.

Figura 28 – Mapa de adequabilidade das urbes melhor qualificadas para a instalação de usinas de biomassa



Fonte: A autora (2021).

5.5 Validação

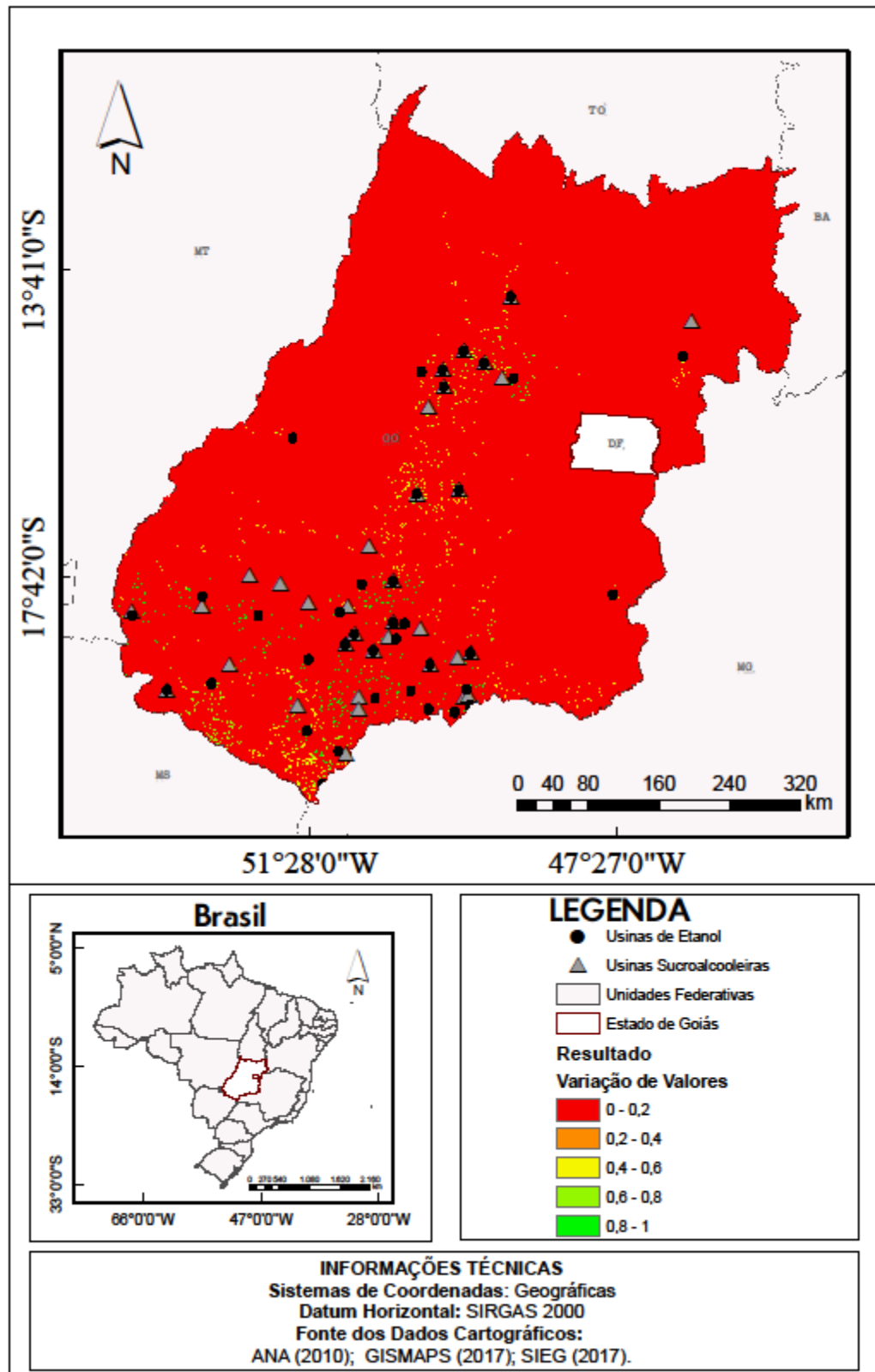
Para a validação do resultado, este foi comparado visualmente com pontos de localização de usinas de cana-de-açúcar (Figura 29) e usinas de biogás (Figura 30) instaladas no estado de Goiás.

Para as Figuras 29 e 30, em vermelho, constam as localidades que não são adequadas para a instalação de usinas de biomassa. As cores: laranja, amarela e verde, representam os locais com adequabilidade segundo o nível de qualificação citado no item 5.4. Os pontos destacados em preto e cinza, representados com triângulos, círculos e alfinetes de localização, representam as usinas instaladas no estado de Goiás conforme a legenda das figuras.

Em preto, na Figura 31, tem-se a extensão territorial do estado de Goiás e em verde as localidades melhor qualificadas (nível 0,8 – 1). Marcadores de alfinete em amarelo e um triângulo alaranjado com um círculo preto no centro representam as localizações das usinas produtoras de biogás instaladas. Localidades as quais elas pertencem estão contornadas na cor vermelha.

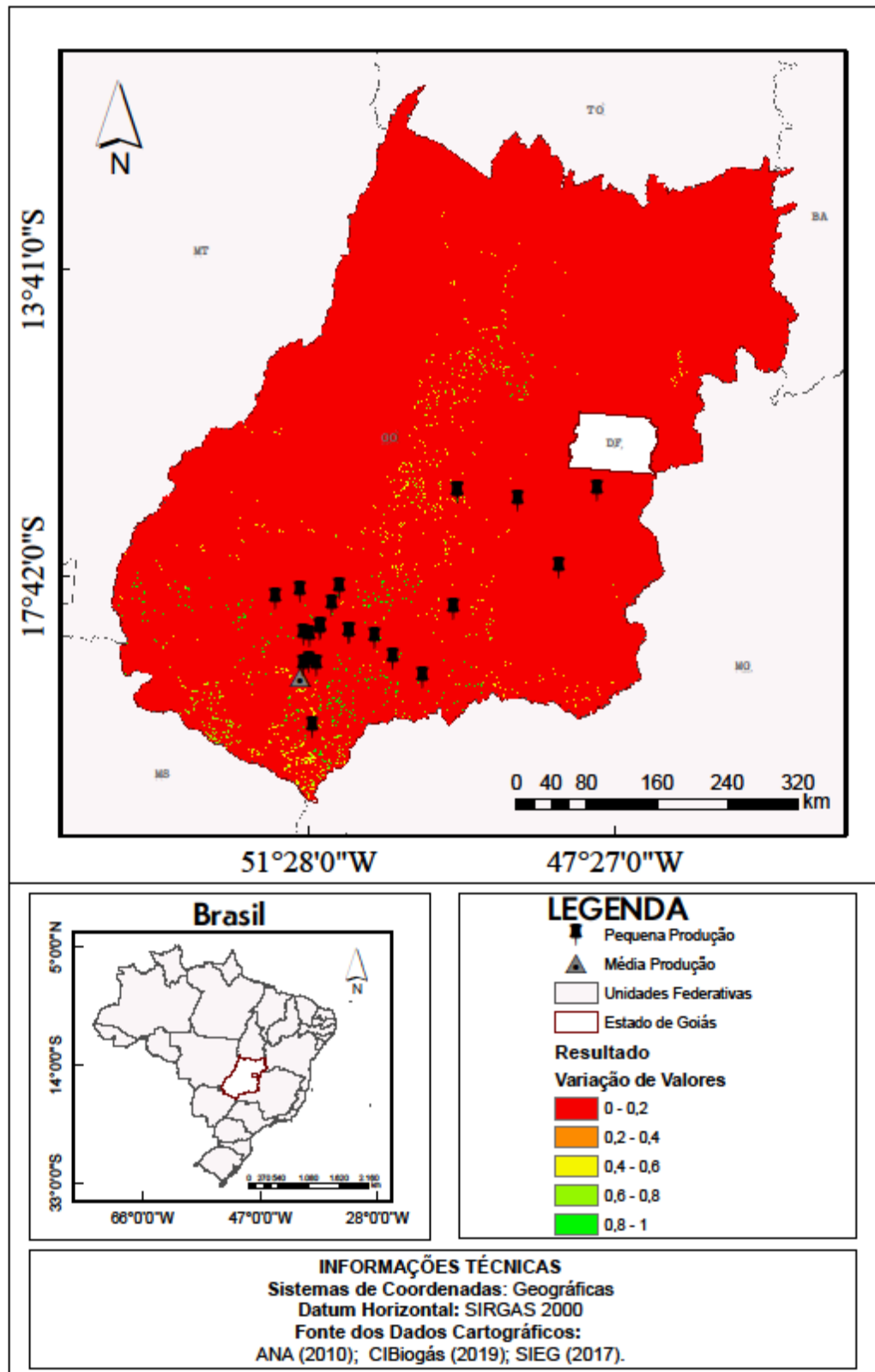
Observando as Figuras 29 a 31, com representação gráfica dos locais apontados como prováveis para a implantação de usinas de biomassa e visualmente ponderando com locais que possuem a instalação, pôde-se chegar à conclusão de que a pesquisa apontou zonas que realmente podem ser viáveis para a disposição de biodigestores no estado de Goiás. Por conseguinte à apresentação dos dados expostos neste trabalho, os gerentes governamentais ou das instituições privadas interessadas, podem realizar visitas técnicas às áreas informadas como adequadas para seleção dos locais finais de instalação promovendo assim a integração entre a teoria e a prática.

Figura 29 – Comparação visual entre os locais potenciais à instalação de usinas de biomassa e localidades onde estão instaladas usinas de cana-de-açúcar



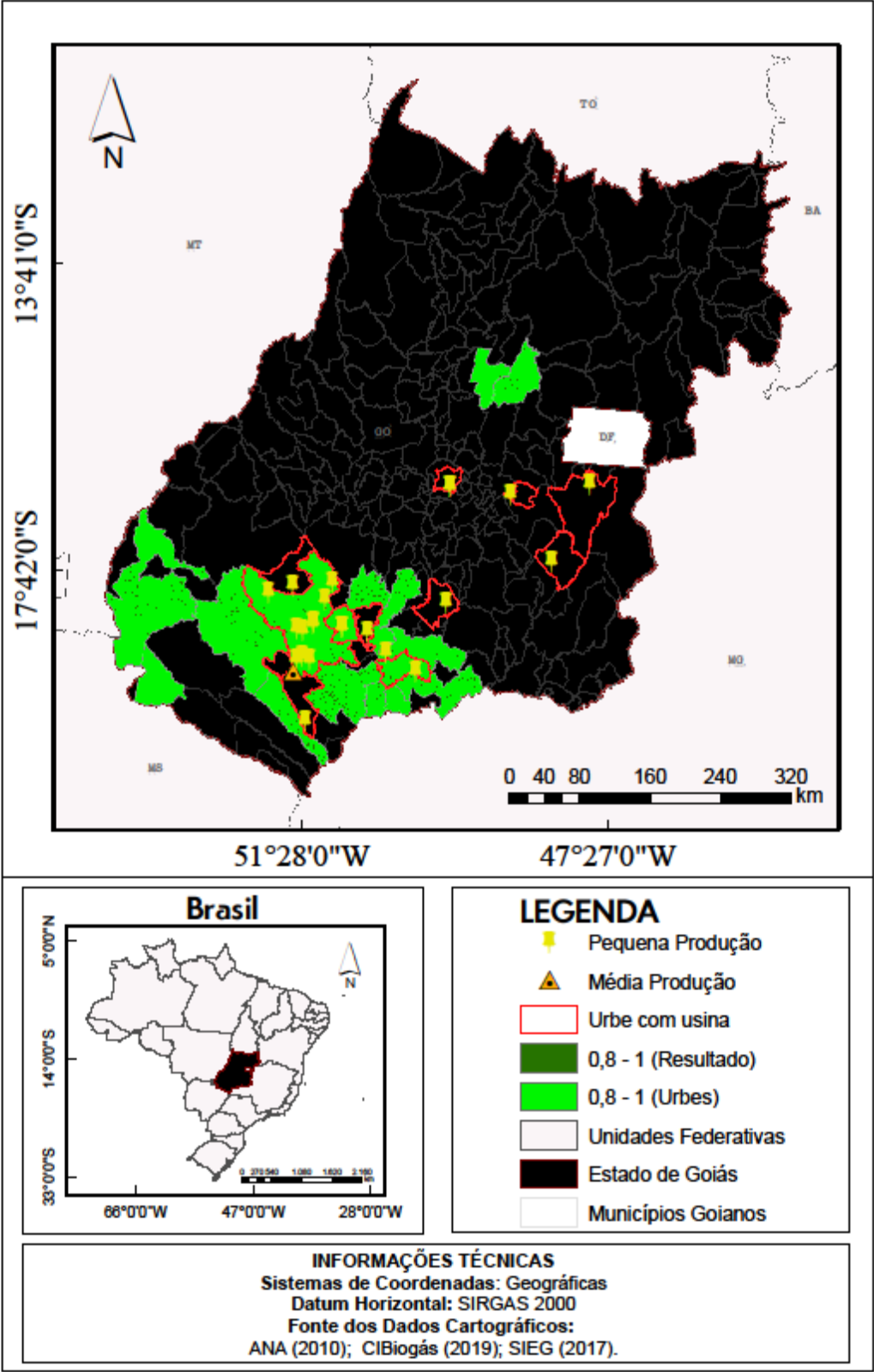
Fonte: A autora (2021).

Figura 30 – Comparação visual entre os locais potenciais à instalação de usinas de biomassa e localidades onde estão instaladas usinas de biogás com sua aplicação para energia elétrica



Fonte: A autora (2021).

Figura 31 – Comparação visual entre as áreas melhor qualificadas e usinas produtoras de biogás



Fonte: A autora (2021).

6 DISCUSSÕES

O modo como os países gerenciam seus resíduos demonstram o seu grau de desenvolvimento. A Alemanha, por exemplo, tendo como instrumento a *Erneuerbaren-Energien-Gesetzes* (Lei Alemã de Energias Renováveis - EEG) oferece subsídios milionários para usinas de biogás almejando uma proteção do clima e do meio ambiente, aumentando a participação das energias renováveis no abastecimento de energia elétrica, a inclusão do biogás da biomassa neste panorama contribui significativamente para que este propósito se constitua por ser um processo de produção descentralizado (FNR, 2016). Combustíveis como etanol, biodiesel e biogás são os principais produtos provenientes da biomassa e podem ser usados para atender às necessidades e demandas de energia.

O biogás, além de gerar o metano (CH_4) que é também um biocombustível, é usado como adustível para fogões ou motores, para geração de energia elétrica e térmica, assim vem ganhando espaço no Brasil e no mundo o seu aproveitamento (CIBIOGÁS, 2019). Com a implementação de biodigestores é possível produzir biogás para queima com presença de motores de cogeração e comercializar energia. No caso da energia elétrica, contribui reduzindo o risco de enfrentamento a crises hídricas e energéticas devido à dependência de usinas hidrelétricas como a principal fonte de energia.

Ao todo exposto, fica evidente que a participação das energias renováveis no quadro de abastecimento de energia propicia uma maior proteção ao clima e contribui para a conservação do meio ambiente, podendo assim elevar o enquadramento de um país a condição de desenvolvido. Sendo o biogás uma fonte de energia descentralizada com benefícios econômicos e sustentáveis, maiores subsídios governamentais para instalação de usinas de biomassa seria uma boa estratégia para aumentar a implantação desta tecnologia limpa de produção de energia renovável. Com o emprego de técnicas como a demonstrada neste trabalho seria propiciada a otimização e maior assertividade na tomada de decisão para a escolha de locais de implantação destes biodigestores para a produção de energia de biomassa.

Hoje, no Brasil, estão instaladas 521 (quinhentas e vinte e uma) usinas de biogás com um volume de produção de $1,35 \times 10^9 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ (CIBIOGÁS, 2019). Em Goiás, existem 36 (trinte e seis) usinas de biogás instaladas com aplicação para produção de energia elétrica, somando um total de $1,15 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ de produção de biogás para o ano de dois mil e dezenove. Com o aproveitamento máximo da capacidade das 17 (dezessete) localidades

apontadas como melhores opções neste estudo, seria possível ter produzido (para o ano de dois mil e dezenove) o volume de $8,81 \times 10^{13}$ Nm³ de biogás. Ainda que apenas uma pequena porção de toda a região da unidade avaliada se mostre mais cômoda para exploração de usinas de biomassa, se gerenciadas adequadamente, seriam suficientes para fornecer uma boa quantidade de energia, visto que pelos cálculos efetuados sobre a capacidade de produção de biogás no estado, chegou-se a um resultado que representa uma capacidade de produção de biogás anual maior do que a atualmente produzida no Brasil.

Considerando que são gerados 6,445 kWh de energia elétrica por 1 Nm³ de biogás composto por 65% de CH₄ (GUSMÃO, 2008; TURNS, 2013), o potencial de geração de energia para Goiás, produzido pelas dezessete unidades indicadas como melhor qualificadas como possíveis locais de instalação de usinas de biomassa, seria de $5,68 \times 10^{14}$ kWh para o ano de dois mil e dezenove.

Esses resultados, acima mencionados, foram alcançados em um ambiente SIG por meio da álgebra de mapas combinando a abordagem *fuzzy* com o AHP. A junção dessas ferramentas permitiu uma maior precisão na combinação de camadas diferentes dentro da álgebra de mapas. A lógica difusa contribuiu de forma a dar proximidade de realidade aos dados, o que seria impossível se fosse trabalhada apenas a lógica booleana, visto que a lógica nebulosa proporciona suavidade na transição entre os dados, admitindo mais possibilidades do que apenas “sim ou não”. O AHP permitiu determinar o peso por prioridade estrutural hierárquica para cada critério dentro da análise. Trabalhar com as duas abordagens juntas possibilitou combinar preferências a valores dos atributos selecionados.

O estudo apontou que há uma enorme potencialidade na produção de biogás com resíduos de cana de açúcar em Goiás, para a instalação de empreendimentos, especialistas poderiam ir a campo fazer uma análise. O objetivo deste trabalho foi atingido ao indicar zonas idealmente aptas para o aproveitamento da biomassa no estado de Goiás para a produção de energia.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como considerações finais deste trabalho, é possível estabelecer:

- Os resultados obtidos neste estudo permitiram identificar locais favoráveis para a produção de energia de biomassa de cana-de-açúcar no estado de Goiás;
- De todos os municípios do estado, 17 (dezesete) possuem maior potencialidade para a instalação de usinas de biomassa de cana-de-açúcar para a produção de energia;
- Os principais critérios restritivos foram: áreas de preservação, declividade, distâncias de áreas agrícolas, de silvicultura, áreas urbanas e hidrografia. Já os principais critérios favoráveis utilizados foram: distância da área produtiva de cana-de-açúcar, produtividade de cana por município, distância da malha rododferroviária;
- No que tange a instalação de usinas de energia renovável, a metodologia contribuiria facilitando a simplificação dos procedimentos e mitigando atrasos no licenciamento ambiental, pois em seus critérios abordam esta questão. Por conseguinte, mostrar que essa é uma ferramenta que pode ser valiosa para o planejamento energético, permitindo a possibilidade de moldar o quadro das atividades de investimento, contribuindo desta maneira até para uma maior implementação de políticas de desenvolvimento sustentável a partir do aproveitamento da biomassa para geração de energia;
- Somente as 17 urbes identificadas em Goiás com potencial de produção de energia de biogás, possuem capacidade para gerar 65 mil vezes mais biogás do que todo o volume de biogás produzido pelo Brasil em 2019;
- A metodologia escolhida pela revisão da literatura é de fácil alteração, podendo assim ser usada para estudo de outros tipos de fontes de energias renováveis, somente demudando os critérios relacionados. Ainda, com um estudo mais amplo, abrangendo outras fontes de biomassa, além da cana-de-açúcar, poderia permitir o aumento da geração de energia produzida no estado de Goiás com fontes renováveis, oferecendo uma maior expressividade desses recursos na matriz energética estadual.

REFERÊNCIAS

AL-YAHYAI, Sultan; CHARABI, Yassine; GASTLI, Adel; AL-BADI, Abdullah. Wind farm land suitability indexing using multi-criteria analysis. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 44, p. 80–87, 2012. 36

ARABATZIS, Garyfallos; MYRONIDIS, Dimitris. Contribution of SHP Stations to the development of an area and their social acceptance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 15, n. 8, p. 3909-3917, 2011. 32

BARBOSA, Cláudio Clemente Faria. Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento. 1997. 157 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997. 20

BENKE, Arthur C. Concepts and patterns of invertebrate production in running Waters. **Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen**, Taylor & Francis, v. 25, n. 1, p. 15–38, 1993. 20

BRASIL. ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Países - Metadados da ANA**. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=72&currTab=simple>. Acesso em: 03 out. 2020. 34

BRASIL. ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3. ed. **Brasília: Aneel**, 2008. 15

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. **Presidência da República–Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, DF, v. 11097, 2005. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm. Acesso em: 17 out. 2020. 16

BRASIL. MMA - Ministério do Meio Ambiente. Download de dados geográficos. Brasília, 2020. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: 07 dez. 2020. 34

BREWER, Justin; AMES, Daniel P.; SOLAN, David; LEE, Randy; CARLISLE, Juliet. Using GIS analytics and social preference data to evaluate utility-scale solar power site suitability. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 81, p. 825–836, 2015. 32

CIBIOGÁS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **BIOGASMAP. Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://mapbiogas.cibiogas.org/>. Acesso em: 10 fev. 2021. 41, 76

CIBIOGÁS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Nota Técnica: Nº 002/2010 – Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020. 16, 17

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Viera. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 344 p. Disponível em: <http://urlib.net/rep/6qtX3pFwXQZ3ukuKE/BQGus>. Acesso em: 05 out. 2020. 21, 39

CHANDIO, Imtiaz Ahmed; MATORI, Abd Nasir B.; WANYUSOF, Khamaruzaman B.; TALPUR, Mir Aftab Hussain; BALOGUN, Abdul-Lateef; LAWAL, Dano Umar. GISbased analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. **Arabian Journal of Geosciences**, Springer, v. 6, n. 8, p. 3059-3066, 2013. 23

CHARABI, Yassine; GASTLI, Adel. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 36, n. 9, p. 2554–2561, 2011. 32

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 7. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 630 p. 19

CIOLKOSZ, Daniel; JACOBSON, Michael; HEIL, Nichole.; BRANDAU, Will. An assessment of farm scale biomass pelleting in the Northeast. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 108, p. 85–91, 2017. 32

COELHO, José Mauro. Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. In: **IV Fórum do biogás**, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017. 35

COLDEBELLA, Anderson; SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; SOUZA, Juliano de; KOHELER, Ana Carolina. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. In: **Anais do 6º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural (AGRENER)**, SciELO, Campinas, 2006. 17

CONLISK, John. Why bounded rationality? **Journal of Economic Literature**, JSTOR, v. 34, n. 2, p. 669–700, 1996. 20

DEMESOUKA, Olympia E.; VAVATSIKOS, Athanasios P.; ANAGNOSTOPOULOS, Konstantinos P. Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system: Method, implementation and case study. **Waste Management**, Elsevier, v. 33, n. 5, p. 1190-1206, 2013. 24

FACHVERBAND BIOGAS. **Biogas market data in Germany 2019/2020**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3uTPHkW>. Acesso em: 16 out. 2020. 16

FIGUEIRA, José; GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias. **Multiple criteria decision analysis: state of art - surveys**. International series in operations research & management science. New York: Springer International Editions - Verlag, 2005. 22

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem Complicação**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 160p. 21

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. **Leitfaden Biogas : von der Gewinnung zur Nutzung**. 5. ed. Gülzow, Germany: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010. 272p. 15

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. **Leitfaden Biogas : von der Gewinnung zur Nutzung**. 7. ed. Gülzow, Germany: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2016. 244p. 31, 32, 35, 76

FUNAI – Fundação Nacional do Índio. **Terra Indígena**. 2020. Disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>. Acesso em: 07 dez. 2020. 34

GISMAPS – Soluções em Geoprocessamento e Mapeamento para Negócios. **Usinas de açúcar e álcool no Brasil – SHP**. Piracicaba - SP, 2017. Disponível em: <https://gismaps.com.br/downloads/usinas-de-acucar-e-alcool-no-brasil-shp/>. Acesso em: 13 fev. 2021. 34, 40

GOES, Tarcizio. A energia que vem da cana-de-açúcar. **Área de Informação da Sede-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, A Lavoura, ano 111, n. 668, p. 27-29, out., Brasília, DF: Embrapa, 2008. 20

GOIÁS. SIEG - SISTEMA ESTADUAL DE GEOINFORMAÇÃO DE GOIÁS. **Assunto: Base Cartográfica, Temas: Limite do Estado de Goiás, Municípios**, 2017. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/siegdwnloads/>. Acesso em: 3 out.2020. 34

GOIÁS. SEDI – Secretaria de Estado de Desenvolvimento e Inovação. **Conheça Goiás**. 2019. Disponível em: <https://www.goias.gov.br/conheca-goias/geografia.html>. Acesso em: 18 out. 2020. 28

GOMES, Felipe Correa de Souza Pereira [*et al.*]. **Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás/Probiogás**. 1. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 147 p. 32

GUSMÃO, Maria Margarida Falcão e Cunha de Campos. **Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em Santa Catarina**. 2008. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. 77

HOUAISS, Antônio. **Michaelis dicionário prático da língua portuguesa**. [S.l.]: Melhoramentos, 1987. 19

IOANNOU, Konstantinos; TSANTOPOULOS, Georgios; ARABATZIS, Garyfallos; ANDREOPOULOU, Zacharoula; ZAFEIRIOU, Eleni. Spatial Decision Support System Framework for the Evaluation of Biomass Energy Production Locations: Case Study in the Regional Unit of Drama, Greece. **Sustainability**, v. 10, n. 2, 2018. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/531>. Acesso em: 02 set.2019. 26, 30, 31, 35, 36, 40, 65

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades. **ESTADIC – Perfil dos Estados Brasileiros**. Panorama. Território e ambiente. Área da unidade territorial, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/panorama>. Acesso em: 02 out. 2020. 28

KÜHMAIER, Martin; KANZIAN, Christian; STAMPFER, Karl. Identification of potential energy wood terminal locations using a spatial multicriteria decision analysis. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 66, p. 337-347, 2014. 25

LAASASENAHO, Kari; LENSU, Anssi; LAUHANEN, Risto; RINTALA, Jukka. GIS-data related route optimization, hierarchical clustering, location optimization, and kernel density methods are useful for promoting distributed bioenergy plant planning in rural areas.

Sustainable Energy Technologies and Assessments, Elsevier, v. 32, p. 47-57, 2019. 27

LIMA JUNIOR, Francisco Rodrigues; CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro; OSIRO, Lauro. Problemas de seleção e avaliação de fornecedores: caracterização da literatura científica por meio de um levantamento bibliográfico sistematizado. *In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*. *In: Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, Belo Horizonte, 2011. 22

LONGLEY, Paul A.; GOODCHILD, Michael F.; MAGUIRE, David J.; RHIND, David W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 540p. 39

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas: Coleção 5.0 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. **Retrieved from Projeto MapBiomas: Coleção**, v. 5, 2020. 30

MBANZE, Aires Afonso; SILVA, Dimas Agostinho; TETTO, Alexandre França; PEREIRA, José Fernando; BATISTA, Antonio Carlos. Potencial energético de combustíveis florestais em cultivos de *Pinus elliottii* no sul do Brasil. **Ciência Florestal**, SciELO, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1640-1650, 2018. 15

MEDEIROS, Anderson. **Análise multicritério em SIG - Parte 1**. CLICKGEO Cursos de Geotecnologias. Paraíba: 30 set. 2013. Disponível em: <http://www.andersonmedeiros.com/analise-multicriterio-em-sig-1/>. Acesso em: 18 out. 2020. 22

MEZZEDIMI, Louise. **Nutec articula com GNR para produzir biogás a partir do lixo**. Governo do estado do Ceará. 17 jul. 2017. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2017/07/17/nutec-articula-com-gnr-para-produzir-biogas-partir-do-lixo/>. Acesso em: 17 out. 2020. 15

MILANEZ, Artur Yabe; GUIMARÃES, Diego Duque; MAIAS, Guilherme Batista da Silva; SOUZA, José Antônio Pereira de; LEMOS, Mário Luiz Freitas. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. [221]-275, 2018. 17, 21

NAKAGAWA, Elisa Yumi. **Sistemas de Suporte à Decisão (DDS)**. Universidade de São Paulo. Instituto de Ciência Matemática e de Computação. Departamento de Ciências de Computação. São Carlos, 2016. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1135542/mod_resource/content/1/2016_Aula07_Sistemas_Tomada_Decisao.pdf. Acesso em: 08 out. 2020. 16

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira. Caracterização ambiental do Estado de Goiás e Distrito Federal como insumo à gestão dos recursos hídricos. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais**, ISSN 2238-3565, v.6, n. 2. p. 34-50. Universidade Estadual de Goiás – UEG, Iporá, jan./jul. 2017. 28

OLIVEIRA, Rafael Deléo e. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. 79 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2009. 16

PAM - PRODUÇÃO AGRÍCOLA MUNICIPAL. **Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes.** In: IBGE. Sidra: sistema IBGE de recuperação automática. Rio de Janeiro, 2019a. 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 02 out.2020. 17, 34, 70

PERPIÑA, Carolina; MARTÍNEZ-LLARIO, José Carlos; PÉREZ-NAVARRO, Ángel. Multicriteria assessment in GIS environments for siting biomass plants. **Land Use Policy**, Elsevier, v. 31, p. 326-335, 2013. 23

PURDY, Andrew; PATHARE, Pankaj B.; WANG, Yadong; ROSKILLY, Anthony Paul; HUANG, Ye. Towards sustainable farming: Feasibility study into energy recovery from bio-waste on a small-scale dairy farm. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 174, p. 899–904, 2018. 32

QGIS Development Team, 2021. **QGIS Geographic Information System.** Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 15 jan. 2021. 30, 32, 35, 36, 37, 39, 40

REIS, Cristiane Fioravante; MORAES, Alessandra da Cunha; PEREIRA, Ailton Vítor; AGUIAR, Amanda Virgínia; SOUSA, Valderês Aparecida; BORGES, Heloísa Martins Dorneles. Diagnóstico do Setor de Florestas Plantadas no Estado de Goiás. **Embrapa Florestas - Livro científico (ALICE)**, Brasília, DF: Embrapa, 2015. 28, 30

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990. 23

SAATY, Thomas L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In: **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys.** International Series in Operations Research & Management Science, v. 78, p. 363–419. Springer, New York, USA, 2005. 23

SANTOS, Marcos; DE ABREU, Viviane Viana Sofiste; GOMES, Carlos Francisco Simões; WALKER, Rubens Aguiar; DOS REIS, Marcone Freitas; DE CARVALHO, Fabrício Baroni. Aplicação da Lógica Fuzzy e do processo de Análise Hierárquica no desenvolvimento de uma armadilha elétrica sustentável. In: **Anais do 11º Congresso Brasileiro de Inovação e Gestão de Desenvolvimento do Produto (CBGDP).** São Paulo, 04-05 set. 2017. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/designproceedings/cbgdp2017/019.pdf>. Acesso em: 18 out. 2020. 22

ŞENER, Şehnaz; SENER, Erhan; NAS, Bilgehan; KARAGÜZEL, Remzi. Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). **Wast Management**, Elsevier, v. 30, n. 11, p. 2037-2046, 2010. 23

SIDRA - SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. Território. *In*: **IBGE**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3kCWryA>. Acesso em: 02 out.2020. 28

SILVA, Roterdan Moura de; BELDERRAIN, Mischel Carmen Neyra. Considerações sobre métodos de decisão multicritério. *In*: **Anais do XI Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA (ENCITA)**, São José dos Campos, v. 1, p. 1–7, 2005. 22

SILVA, Sandra; ALÇADA-ALMEIDA, Luís; DIAS, Luís C. Biogas plants site selection integrating multicriteria decision aid methods and gis techniques: A case study in a portuguese region. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 71, p. 58–68, 2014. 26

SNA - SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. **Brasil é o país com maior potencial de produção de bioenergia no mundo**. 7 ago. 2019. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/brasil-e-o-pais-com-maior-potencial-de-producao-de-bioenergia-no-mundo/>. Acesso em: 18 out. 2020. 16

SOUZA, Carlos M; SHIMBO, Julia Z; ROSA, Marcos R; PARENTE, Leandro L; ALENCAR, Ane A; RUDORFF, Bernardo FT; HASENACK, Heinrich; MATSUMOTO, Marcelo; FERREIRA, Laerte G; SOUZA-FILHO, Pedro WM *et al*. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020. ISSN 2072-4292. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735>. Acesso em: 07 dez. 2020. 34

TORQUATO, Sérgio Alves; RAMOS, Rejane Cecilia. Biomassa da cana-de-açúcar e a geração de bioeletricidade em São Paulo: usinas signatárias ao Protocolo Agroambiental Paulista. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.43, n.5, set./out. 2013. 17, 35

TURNES, Stephen R. **Introdução à combustão: conceitos e aplicações**. Tradução: Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior. 3. ed. AMGH editora: Porto Alegre, 2013. 402p. 77

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Observatório da Cana. Histórico de Produção e Moagem. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2019/2020**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3kK7XZe>. Acesso em: 23 jan. 2021. 34

VALERIANO, Márcio de Morisson; ROSSETTI, Dilce de Fátima. Topodata: Brazilian full coverage refinement of srtm data. **Applied Geography**, Elsevier, v. 32, n. 2, p. 300–309, 2012. 34

WANG, Yingxu; LIU, Dong; RUHE, Guenther. Formal description of the cognitive process of decision making. *In*: IEEE. **Proceedings of the Third IEEE International Conference on Cognitive Informatics, 2004**. [S.l.], 2004. p. 124–130. 19, 20

ZANG, Joachim W; MARTINS, Kairo F; FONSECA-ZANG, Warde A Da. Life cycle inventory for biomethane as a diesel substitute for the brazilian ethanol industry-case study. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 153, p. 444–449, 2018. 16