



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



EDVALDO PEREIRA SANTOS JÚNIOR

**CONCENTRAÇÃO, POLARIZAÇÃO E EFEITO ESPAÇO-TEMPORAL DA
BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)**

JOÃO PESSOA - PB
2020

EDVALDO PEREIRA SANTOS JÚNIOR

**CONCENTRAÇÃO, POLARIZAÇÃO E EFEITO ESPAÇO-TEMPORAL DA
BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA - PB
2020**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237c Santos Júnior, Edvaldo Pereira.

Concentração, polarização e efeito espaço-temporal da bioeletricidade florestal no Brasil (2000 - 2019) / Edvaldo Pereira Santos Júnior. - João Pessoa, 2020. 186 f. : il.

Orientação: Luiz Moreira Coelho Junior.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energias renováveis. 2. Biomassa florestal. 3. Economia florestal. 4. Economia regional. 5. Bioenergia. I. Coelho Junior, Luiz Moreira. II. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)

EDVALDO PEREIRA SANTOS JÚNIOR

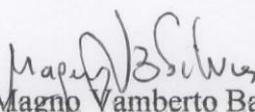
**CONCENTRAÇÃO, POLARIZAÇÃO E EFEITO ESPAÇO-TEMPORAL DA
BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de Setembro de 2020.

Prof. Dr. Flávio José Simioni

UDESC

Prof. Dr.  Vamberto Batista Da Silva

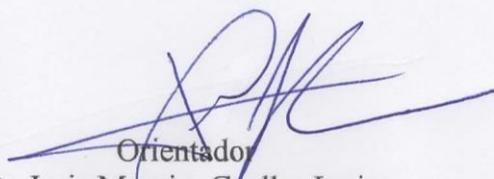
UFPB

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes

UFPE

Prof. Dr. Paulo Rotela Junior

UFPB


Orientador
Dr. Luiz Moreira Coelho Junior

**JOÃO PESSOA – PB
2020**

À Inês Caldas (*in memoriam*)
Dedico!

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por me proporcionar força espiritual e ânimo nos momentos mais difíceis e achei que falharia, pois foi a fé nele que tantas vezes encontrei o caminho para seguir.

Aos meus pais, Edvaldo Santos e Marta Gorete, que sem grandes riquezas, fizeram o impossível para que tivesse tranquilidade e condições de chegar até aqui. Foram eles que me deram apoio e amor incondicional, em toda minha caminhada. Ao meu irmão Eric Santos pela força e sorrisos proporcionados quando necessário.

À Ana Beatriz que esteve ao meu lado nos últimos anos, em todas as alegrias e tristezas. É a mulher que me motiva a buscar meus sonhos e metas. Sinceramente, meu muito obrigado.

Sou imensamente grato ao professor Luiz Moreira Coelho Junior pela orientação, dedicação, empenho e apoio oferecido durante oito anos de trabalho conjunto, desde os tempos de PIBIC e TCC, e tenho a certeza de que não chegaria até aqui sem seu aporte.

Agradeço o apoio de Anna Manuella, colega de curso e amiga, que só a correria e as dificuldades da vida acadêmica podem revelar. Também, deixo minha gratidão aos professores Magno Batista (CCSA-UFPB), Paulo Rotela (CT-UFPB), Rogério Peruchi (CT-UFPB) e Zaqueu Ernesto (CEAR-UFPB), além de todos os colaboradores do PPGER.

Embora simples, aqui ficam meus agradecimentos a todos aqueles que me auxiliaram de alguma forma para concretizar esta dissertação.

“Não se conforme com o possível quando você pode fazer o seu melhor! (...) Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores para fazer melhor ainda!”

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

A geração de eletricidade por meio dos recursos florestais se relaciona com a dinâmica do setor de base florestal. Esta dissertação analisou a concentração, a polarização e o efeito espaço-temporal da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019. Os dados da outorga das termelétricas de biomassa florestal foram obtidos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Foi realizado um estudo bibliométrico e revisão sistemática da literatura da análise espacial da bioeletricidade florestal. Para economia regional, utilizou-se os indicadores de concentração, de polarização e para economia espacial, a análise exploratória de dados espaciais e a estatística scan. Os principais resultados mostraram que na bibliometria e revisão sistemática da literatura houve poucos estudos em análises espaciais da bioeletricidade florestal, nas bases Web of Science e Scopus. No Brasil, a oferta outorgada de eletricidade de biomassa florestal cresceu de 562,90 MW e 11 termelétricas, em 2000, para 3.532,61 MW e 115 termelétricas, em 2019, com uma taxa média anual de 13,20% a.a. para quantidade de termelétricas e 10,15% a.a. para potência outorgada. Os principais estados produtores foram: Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Para a concentração estadual, o $CR(4)$ e o $CR(8)$ apontaram concentração média a moderadamente alta e o HHI inferiu uma distribuição atomizada. Houve um aumento na polarização estadual e entre usinas, proporcionado pela outorga das térmicas à licor negro, a partir de 2013. Nas análises exploratórias de dados espaciais, o índice local (I_{Moran_Local}) evidenciou a existência *clusters* de alta potência, destacando-se o eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, e as térmicas do Paraná e do Mato Grosso do Sul. O efeito espaço temporal, observado pela estatística scan, mostrou que os conglomerados da bioeletricidade florestal brasileira estão na porção Centro-Sul do Brasil associados às termoelétricas de licor negro e resíduos florestais. Pode-se concluir que o desenvolvimento desta dissertação contribuiu para uma melhor compreensão espacial da bioeletricidade florestal brasileira.

Palavras-chave: Bioenergia, Biomassa florestal, Economia florestal, Economia regional.

ABSTRACT

The generation of electricity through forest resources is related to the dynamics of the forest-based sector. This dissertation analyzed the concentration, polarization and spatio-temporal effect of forest bioelectricity in Brazil, from 2000 to 2019. The data for the granting of forest biomass thermoelectric plants were obtained from the National Electric Energy Agency (ANEEL). A bibliometric study and systematic literature review of the spatial analysis of forest bioelectricity was carried out. For regional economics, indicators of concentration, polarization and space economics, exploratory analysis of spatial data and scan statistics were used. The main results showed that in bibliometrics and systematic literature review, there were few studies on spatial analysis of forest bioelectricity, in the web of Science and Scopus databases. In Brazil, the supply of electricity from forest biomass increased from 562.90 MW and 11 thermoelectric plants in 2000 to 3,532.61 MW and 115 thermoelectric plants in 2019, with an average annual rate of 13.20% p.a. for the number of thermoelectric plants and 10.15% p.a. for power granted. The main producing states were: Paraná, Bahia, Espírito Santo and Mato Grosso do Sul. For the state concentration, the $CR(4)$ and the $CR(8)$ showed medium to moderately high concentration and the HHI inferred an atomized distribution. There was an increase in state and plant polarization, provided by the granting of thermal plants to black liquor, starting in 2013. In exploratory analysis of spatial data, the local index (I_{Moran_Local}) evidenced the existence of some high-powered clusters, standing out the Bahia, Espírito Santo and Minas Gerais axis, and the Paraná and Mato Grosso do Sul thermals. The temporal space effect, observed by the scan statistic, showed that the Brazilian forest bioelectricity conglomerates are in the Center-South portion of Brazil associated with the thermoelectric plants with black liquor and forest residues. It can be concluded that the development of this dissertation contributed to a better spatial understanding of Brazilian forest bioelectricity.

Keywords: Bioenergy, Forest biomass, Forest economy, regional economy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1.1	INTRODUÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
1.3.1	Energia no mundo	19
1.3.2	Energia no Brasil.....	21
1.3.3	Biomassa	23
1.3.4	Setor florestal	29
1.3.5	Biomassa florestal para eletricidade.....	35
1.3.6	Economia Regional e Espacial.....	38
1.3.7	Economia industrial	44
1.3.8	Polarização e desigualdade	46
2	ARTIGO 1 – EVIDÊNCIAS DA BIONERGIA PARA A BIOELETRICIDADE FLORESTAL: UMA REVISÃO SOB ANÁLISE ESPACIAL (1980 -2019).....	48
	RESUMO	48
	ABSTRACT	49
2.1	INTRODUÇÃO	50
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	51
2.2.1	Bibliometria e Revisão sistemática	51
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
2.4	CONCLUSÃO	70
2.5	REFERÊNCIAS.....	71
3	ARTIGO 2 – LOCALIZAÇÃO E CONCENTRAÇÃO BRASILEIRA DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL (2000-2019).....	77
	RESUMO	77
	ABSTRACT	78
3.1	INTRODUÇÃO	79
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	81
3.2.1	Objeto de estudo.....	81
3.2.2	Medidas locacionais, de concentração e de desigualdade.....	82
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
3.4	CONCLUSÃO	94
3.5	REFERÊNCIAS.....	95
4	ARTIGO 3 - POLARIZAÇÃO DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019).....	100
	RESUMO	100
	ABSTRACT	101
4.1	INTRODUÇÃO	102
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	103
4.2.1	Objeto de estudo.....	103
4.2.2	Curva de Lorenz e o Coeficiente de Gini.....	104
4.2.3	Medidas de polarização.....	106

4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
4.4	CONCLUSÃO	117
4.5	REFERÊNCIAS	118
5	ARTIGO 4 - DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)	121
	RESUMO	121
	ABSTRACT	122
5.1	INTRODUÇÃO	123
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	125
5.2.1	Objeto de estudo.....	125
5.2.2	Análise Exploratória de Dados Espaciais	125
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	129
5.4	CONCLUSÃO	140
5.5	REFERÊNCIAS	141
6	ARTIGO 5 – ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS CONGLOMERADOS DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)	144
	RESUMO	144
	ABSTRACT	145
6.1	INTRODUÇÃO	146
6.2	MATERIAL E MÉTODOS	148
6.2.1	Objeto de estudo.....	148
6.2.2	Estatística Scan.....	148
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	150
6.4	CONCLUSÃO	157
6.5	REFERÊNCIAS	158
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
8	REFERÊNCIAS	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Rotas de conversão energética da biomassa.....	26
Figura 1.2. Produção mundial madeireira dos continentes ($\times 10^6$ m ³), de 1970 a 2019.	30
Figura 1.3. Participação dos biomas (a) e das espécies plantadas (b), no território brasileiro, em 2018.	32
Figura 1.4. Evolução da produção anual de madeira, por tipo de floresta, em milhões de metros cúbicos ($\times 10^6$ m ³), no Brasil, de 1998 a 2017.....	33
Figura 1.5. Evolução da produção anual de madeira, por tipo de produto, em milhões de metros cúbicos ($\times 10^6$ m ³), do extrativismo vegetal (a) e da silvicultura (b), no Brasil, de 1998 a 2017.	34
Figura 1.6. Evolução da produção madeireira, por finalidade de uso, em milhões de metros cúbicos ($\times 10^6$ m ³), no Brasil, de 1998 a 2017.....	35
Figura 1.7. Evolução das principais teorias em economia regional.	39
Figura 2.1. Resumo descritivo das etapas de revisão sistemática.	52
Figura 2.2. Etapas da pesquisa para análises espaciais da bioeletricidade florestal.....	54
Figura 2.3. Evolução das publicações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, nas plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019.....	56
Figura 2.4. Distribuição espacial, por países, em quartis, da quantidade de publicações científicas, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, nas plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019.....	57
Figura 2.5. Visualização de clusters temáticos, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019.....	60
Figura 2.6. Diagrama de Venn para classificação da análise espacial da bioeletricidade florestal.	61
Figura 3.1. Evolução da distribuição espacial das termelétricas de base florestal, no Brasil, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.....	86
Figura 3.2. Evolução do Quociente Locacional da potência outorgada da biomassa florestal (nível 2), nos Estados brasileiros, em 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.	89
Figura 3.3. Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada dos estados brasileiros para bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d)	91
Figura 3.4. Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada nas termelétricas da bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d).	93
Figura 4.1. Curva de Lorenz.....	105
Figura 4.2. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster (c) e Wolfson e Esteban e Ray (d), de 2000 a 2019.	110
Figura 4.3. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster (c) e Wolfson e Esteban e Ray (d), de 2000 a 2019.	113
Figura 4.4. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas termelétricas brasileiras. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster (c) e Wolfson e Esteban e Ray (d), de 2000 a 2019.....	114

Figura 4.5. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal brasileiras, entre as fontes nível 2. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster (c) e Wolfson e Esteban e Ray (d), de 2000 a 2019.	116
Figura 5.1. Diagrama de dispersão de Moran.....	127
Figura 5.2. Distribuição espacial das termelétricas e dos quartis da potência outorgada (MW), para a bioeletricidade florestal, no Brasil, para 2000, 2010 e 2019.	129
Figura 5.3. Diagrama de dispersão do I_{Moran_Global} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, nos anos de 2000, 2010 e 2019.	134
Figura 5.4. Distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019.	136
Figura 5.5. Distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 2, para a matriz de contiguidade “rainha”, para 2000, 2010 e 2019.	138
Figura 6.1. Clusters das termoeletricas de base florestal no Brasil, entre 2000 a 2019, para probabilidade de 5,0%, 8,6%, 20,0% e 30,0% dos geradores serem de base florestal.....	151
Figura 6.2 Evolução da potência outorgada (MegaWatts - MW), observada e esperada, no exterior (Pot. _{Ext.}) e no interior (Pot. _{Int.}) dos clusters das termoeletricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Oferta energética mundial, em $\times 10^6$ tep, por tipo de fonte, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2017.	19
Tabela 1.2. Oferta mundial de eletricidade, em TWh (Tera Watts hora), por tipo de fonte, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2017.	20
Tabela 1.3. Oferta energética no Brasil, em $\times 10^3$ tep, por tipo de fonte, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.	21
Tabela 1.4. Geração de eletricidade, em GWh (Giga Watts hora), por tipo de fonte, no Brasil, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.	22
Tabela 1.5. Evolução do consumo final de biomassa, em $\times 10^3$ tep, por setores, no Brasil, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.	23
Tabela 1.6. Produção madeireira ($\times 10^6$ m ³) dos 10 maiores países, com base em 2019, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019.	31
Tabela 1.7. Produção de madeira, para uso combustível ($\times 10^6$ m ³), dos 10 maiores países, com base em 2019, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019.	32
Tabela 2.1. Classificação das análises espaciais da bioeletricidade florestal.	55
Tabela 2.2. Periódicos de publicação científica e indicadores de fator de impacto e citações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019.	59
Tabela 2.3. Referências e número de citações dos artigos da análise espacial da bioeletricidade florestal, por áreas de análise de conteúdo, de 1989 a 2019.	62
Tabela 3.1. Classificação da Razão Concentração dos quatro maiores [CR(4)] e dos oito maiores [CR(8)] participantes.	83
Tabela 3.2. Evolução das termelétricas de base florestal (fontes nível 1 e 2) e potência outorgada (MegaWatts – MW), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.	87
Tabela 4.1. Evolução da distribuição regional e estadual das termelétricas de base florestal potencial outorgado (Mega Watts - MW), no Brasil, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.	108
Tabela 5.1. Índices de Moran global da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para as matrizes de contiguidade (convenções “rainha” e “torre”) e de k-vizinhos mais próximos (2, 4 e 6), para 2000, 2010 e 2019.	133
Tabela 6.1. Caracterização dos clusters das termelétricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.	152
Tabela 6.2. Caracterização de clusters isolados das termelétricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.	156

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

A biomassa é o recurso energético mais antigo utilizado pela humanidade. Seu aproveitamento na forma de energia acompanhou o desenvolvimento civil, também evoluindo em sua finalidade e forma de obtenção. Alguns exemplos são a extração da lenha para cocção e aquecimento ou práticas modernas de extrativismo vegetal e de silvicultura, para obtenção de madeira para as indústrias de transformação, geração de calor, força motriz e eletricidade (SHIMELMITZ et al, 2014).

Para Perlin e Jordan (1983), a biomassa foi fundamental no desenvolvimento de cidades nas civilizações antigas, principalmente a partir das florestas, que foram utilizadas para construção e aquecimento. Os primeiros passos para a industrialização também foram baseados em recursos florestais; em meados do século XIX, a biomassa da madeira era uma importante fonte de energia para os países que iniciavam seu processo de industrialização (ROSILLO-CALLE; HALL, 2002).

A partir do século XX, diversas usinas de biomassa passaram a gerar energia elétrica, diretamente ou do processo combinado de calor e eletricidade, a partir da cogeração. A utilização sustentável da biomassa apresentou elevado crescimento em escala global, dado o aumento populacional, a melhoria dos padrões de vida e a consequente demanda energética da população. Dentre as vantagens do uso estão a rápida reposição, adaptação regional e capacidade de redução das emissões de gases do efeito estufa (ROSILLI-CALLE; WOODS, 2012).

De acordo com Looney (2020), em 2019, o consumo energético mundial foi 13.946,21 milhões de toneladas equivalente de petróleo (tep), considerando-se um aumento de 1,34%, em comparação a 2018 (13.763,02 milhões tep). Os combustíveis exauríveis representaram 12.354,54 milhões tep (88,59%) e os renováveis 1.591,67 milhões tep (11,41%). Para a eletricidade, em 2019, a produção mundial foi 26.691 TWh (Tera Watts hora), o continente asiático apresentou a maior produção, com 12.391 TWh (45,16%), seguido das Américas (6.679 TWh) e da Europa (3.831 TWh). Os países com maior produção foram a China (7.482 TWh), os Estados Unidos (4.385 TWh) e a Índia (1.614

TWh). A partir das fontes renováveis foram gerados 7.105,14 TWh (26,62%) (ENERDATA, 2020).

A biomassa foi a terceira principal fonte renovável para eletricidade no mundo, com 595,60 TWh gerados, em 2018. Estima-se que com o estabelecimento de políticas públicas voltadas à bioeletricidade, a potência mundial a partir da biomassa possa chegar a 1.600 TWh, até o ano de 2040, com aumento da participação de 9% para 12% na matriz elétrica renovável. O país com maior crescimento deve ser a China, com incremento de 2.200 TWh de potência renovável, onde 15% (330 TWh) deverá ser a partir de biomassa; com relação à capacidade instalada este valor deve ser de 3.700 GW, com 250 GW (7%) para a biomassa (ENERDATA, 2019; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2014).

No Brasil, a oferta de bioeletricidade é resultado, principalmente, do processo de cogeração, ou seja, do aproveitamento do calor e resíduos nas indústrias, tanto as sucroalcooleiras quanto as de papel e celulose. Ressalta-se que para empresas de grande porte e com elevada eficiência energética é comum a geração de excedente de eletricidade, sendo este comercializado no mercado regulado, mercado livre ou de curto prazo (TOLMASQUIM, 2016).

Dentre os recursos utilizados para bioeletricidade no Brasil, destacam-se o bagaço de cana de açúcar, o licor negro, os resíduos florestais, o biogás de resíduos urbanos e o gás de alto forno da biomassa. Dos principais recursos, três resultam das florestas (licor negro, resíduos florestais e gás de alto forno); a potência instalada de bioeletricidade florestal no Brasil, em 2019, foi 3,24 GW, correspondente a 1,88% da oferta nacional de eletricidade, e contou com 105 termelétricas em operação (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2019).

O território brasileiro apresenta extensão de aproximadamente 851,57 milhões de hectares (Mha), dos quais 7,83 Mha (0,92% do território nacional) são destinadas às florestas plantadas (silvicultura) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ 2019). Para Tolmasquim (2016), a produtividade florestal brasileira é uma das maiores do mundo, dada as condições edafoclimáticas e o aprimoramento técnico de seu setor florestal. Em 2019, o Brasil apresentou produção madeireira de 281,52 x10⁶ metros cúbicos (m³), sendo o quarto maior produtor mundial de madeira (FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION – FAO, 2020). As duas principais espécies da silvicultura nacional são o eucalipto e o pinus, as quais são destinadas,

principalmente, para as indústrias de celulose e papel, serrarias, produção do carvão vegetal e siderúrgicas (IBÁ, 2019).

Diante a relevância do uso da biomassa florestal no Brasil, da capacidade para geração de eletricidade, principalmente a partir de sistemas integrados de cogeração nos setores industriais, e para compreender a dimensão e distribuição da oferta brasileira da bioeletricidade florestal, reuniu-se algumas técnicas da análise de localização, concentração, polarização e distribuição espaço temporal aplicadas a bioeletricidade florestal no Brasil.

De acordo com Suzigan et al. (2003) a utilização de indicadores de localização regional e de concentração industrial permite verificar a distribuição espacial, identificar a localização e mapear movimentos de deslocamento regional do mercado, sejam do processo de concentração ou de descentralização econômica. Por sua vez, a polarização tende a auxiliar a compreensão da disposição de atividades. O fenômeno da polarização pode ser compreendido como o grau no qual uma distribuição se agrupa em polos homogêneos, distantes um do outro; sendo um setor altamente polarizado aquele onde há poucos polos com grande número de participantes e alto grau de oposição entre grupos (DURO; PADILLA, 2013).

Por sua vez, a análise exploratória de dados espaciais (AEDE) fornece medidas de autocorrelação espacial global e local, que são fundamentais para delinear a distribuição espacial, detectando a correlação de amostras (YANG; WONG, 2013). O estudo e a identificação de *clusters*, que também pode ser realizado com base na estatística *scan*, podem contribuir na compreensão de padrões espaciais, auxiliando a tomada de decisão das políticas de competitividade da indústria e desenvolvimento regional (HALLENCREUTZ; LUNDEQUIST, 2003).

Esta dissertação foi desenvolvida em duas partes, a primeira composta de um referencial teórico e a segunda por cinco (05) artigos. O referencial teórico apresentou os principais conceitos relativos à biomassa florestal e o panorama de sua utilização mundial, processos de conversão bioenergética, apresentação e descrição do setor florestal e uma breve revisão das ferramentas metodológicas utilizadas.

No primeiro artigo se realizou uma análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura da bioenergia florestal, com ênfase nos estudos espaciais da bioeletricidade florestal, a partir de periódicos indexados na base da *ISI Web of Knowledge* e *Scopus*, no período de 1976 a 2019. O segundo artigo analisou a localização e concentração na

bioeletricidade florestal brasileira, de 2000 a 2019. Para mensurar a localização regional e a concentração industrial foram utilizados o Quociente Locacional (QL), a Razão de Concentração [$CR(k)$], Índice de Herfindahl-Hirschman (HHI), o Índice de Hoover (H), e o coeficiente de desigualdade de Gini (G).

O terceiro artigo analisou a polarização da bioeletricidade florestal, no Brasil, no período de 2000 a 2019; a partir das medidas de bipolarização de Foster e Wolfson e da polarização de múltiplos grupos de Esteban e Ray. O quarto trabalho observou a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, no período, de 2000 a 2019, por meio da análise exploratória de dados espaciais (AEDE). Complementando as análises, o último trabalho observou os conglomerados espaço temporais da bioeletricidade florestal brasileira, no período de 2000 a 2019, evidenciando os períodos de existência de *clusters*. Foi utilizada uma análise espaço temporal para alta conglomeração com base no modelo de permutação espaço tempo da estatística *scan*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a concentração, a polarização e o efeito espaço-temporal da bioeletricidade florestal no Brasil, no período de 2000 a 2019.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar a análise bibliométrica e revisão sistemática aplicadas a bioeletricidade florestal mundial, com ênfase na análise espacial, de 1980 e 2019;
- b) Analisar a localização e concentração brasileira da bioeletricidade florestal, no período de 2000 a 2019;
- c) Analisar a polarização da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019;
- d) Analisar a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019;
- e) Analisar o efeito espaço-tempo dos conglomerados da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019.

1.3 REFERENCIAL TEÓRICO

O Referencial Teórico foi estruturado em tópicos relevantes à bioeletricidade florestal no Brasil e nas teorias científicas utilizadas como método nesta dissertação. Descreveu-se sobre a oferta energética mundial e brasileira, a temática da biomassa e suas formas de conversão, a apresentação do setor florestal (mundial e brasileiro) e da biomassa voltada à geração de eletricidade. Foram expostas algumas teorias como economia industrial, regional e espacial, com foco nas medidas de concentração, polarização, análise exploratória de dados espaciais e estatística scan.

1.3.1 Energia no mundo

A Tabela 1.1 apresenta a evolução da oferta energética global por fonte de energia, em $\times 10^6$ tep, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018 (IEA, 2020). Em 1990, a oferta energética foi 8,76 bilhões tep e cresceu para 14,28 bilhões tep, em 2017, o que representou crescimento médio anual de 196,92 milhões tep. O óleo combustível foi o principal recurso energético, associado majoritariamente aos processos industriais. Apesar do aumento do uso das energias renováveis, o consumo de óleo cresceu, saltando de 3,23 bilhões tep (1990) para 4,50 bilhões tep (2018), com crescimento médio de 1,18% a.a.

Tabela 1.1. Oferta energética mundial por tipo de fonte, em $\times 10^6$ tep, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018.

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Óleo diesel	3.232,74	3.373,48	3.662,67	3.998,70	4.135,58	4.329,22	4.496,70
Carvão mineral	2.220,47	2.207,27	2.316,67	2.994,44	3.653,11	3.852,54	3.838,33
Gás natural	1.663,61	1.807,79	2.072,29	2.360,51	2.733,10	2.949,91	3.261,60
Biomassa	902,37	978,74	1.011,99	1.081,53	1.202,12	1.286,06	1.327,13
Nuclear	525,52	608,10	675,47	721,71	718,83	670,30	706,81
Hídrica	184,10	212,82	224,69	252,35	296,07	335,52	362,33
Outras	36,56	42,38	60,05	70,02	110,08	204,19	286,38
Total	8.765,36	9.230,56	10.023,83	11.479,25	12.848,87	13.627,74	14.279,28

Fonte: IEA, 2020.

A biomassa foi o recurso renovável que apresentou maior participação na matriz energética. Em 1990, com 902,38 milhões tep fornecidos, representou 10,29% do suprimento mundial. Em 2018, a participação do recurso na oferta mundial foi de 9,29%,

com disponibilidade de 1,33 bilhões tep, o crescimento foi 1,38% a.a. (1990 – 2018). A energia hidráulica foi a segunda renovável mais significativa. As fontes renováveis de energia apresentaram maior participação no fornecimento de eletricidade, comparado à oferta energética primária.

A Tabela 1.2 apresenta a evolução da oferta mundial de eletricidade por tipo de fonte, em Tera Watts hora (TWh), para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018. Os recursos não renováveis apresentaram a maior parcela da matriz elétrica mundial. Em 1990, as fontes fósseis geraram 9.517,49 TWh (80,11%), sendo o carvão mineral (4.429,51 TWh) o recurso com maior participação (37,22%). Para o mesmo ano, as fontes renováveis forneceram 2.382,84 TWh (20,02%) e o recurso hidráulico foi o principal, com 2.191,69 TWh (18,42%) (IEA, 2020).

A participação das fontes de energia renovável apresentou aumento anual médio de 3,91% a.a. (1990 a 2018), superior ao de recursos fósseis que cresceram em 2,65% a.a.. Em 2018, a geração renovável foi 6.926,09 TWh, com participação de 25,91% do produzido, destacando-se a energia hidrelétrica (16,18%), a eólica (4,76%) e a biomassa (2,38%). O fornecimento da bioeletricidade foi 129,62 TWh (1990), passando a 637,24 TWh (2018); a utilização da biomassa apresentou crescimento médio de 5,85% a.a..

Tabela 1.2. Oferta mundial de eletricidade por tipo de fonte, em TWh, para 1990, 1995, 2000, 2010, 2015 e 2018.

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Não renováveis	9.517,50	10.580,48	12.551,61	14.929,10	17.238,59	18.675,83	19.803,98
Carvão mineral	4.429,51	4.992,43	5.994,50	7.321,70	8.666,20	9.553,50	10.159,65
Óleo combustível	1.324,82	1.235,83	1.206,77	1.135,31	977,33	975,91	783,70
Gás natural	1.750,27	2.020,27	2.759,72	3.704,14	4.838,77	5.576,26	6.150,20
Nuclear	2.012,90	2.331,95	2.590,62	2.767,95	2.756,29	2.570,17	2.710,43
Renováveis	2.362,89	2.725,40	2.945,21	3.415,45	4.343,73	5.689,25	6.926,09
Biomassa	129,62	130,02	163,95	228,70	369,59	519,36	637,24
Hídrica	2.191,68	2.545,97	2.695,85	3.019,50	3.530,27	3.989,83	4.325,11
Geotérmica	36,43	39,90	51,99	58,28	68,11	80,56	88,96
Fotovoltaica	0,09	0,20	0,99	3,93	32,22	250,57	554,38
Térmica solar	0,66	0,82	0,53	0,60	1,65	9,61	11,32
Eólica	3,88	7,96	31,35	103,92	341,38	838,31	1.273,41
Maré motriz	0,54	0,55	0,55	0,52	0,51	1,01	1,05
Outras	37,72	41,46	54,06	63,33	102,49	341,75	34,62
Total	11.880,39	13.305,88	15.496,82	18.344,55	21.582,32	24.365,08	26.730,07

Fonte: IEA, 2019.

1.3.2 Energia no Brasil

A Tabela 1.3 apresenta a oferta energética no Brasil por tipo de fonte, em $\times 10^3$ tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. No Brasil, a partir de 1970, houve um aumento significativo na oferta, devido crescimento da participação das fontes fósseis na matriz energética. A oferta total de energia, no Brasil, passou de 66,95 para 294 294 milhões tep, com crescimento de 3,06% a.a., entre 1970 e 2019. As fontes não renováveis apresentaram crescimento de 3,60% a.a., saltando de 27,92 (1970) para 158,40 milhões tep (2019); destacaram-se o petróleo e seus derivados, com média de 71,93 milhões tep (40,60% do total) e o gás natural, com média de 12,50 milhões tep e crescimento de 11,54% a.a. (EPE, 2020).

As fontes renováveis apresentaram crescimento de 2,57% a.a., saltando de 39,03 (1970) para 135,64 milhões tep (2019). Destas, destacou-se a biomassa da cana (agroindústria), que apresentou o maior crescimento anual na oferta, com 5,64% a.a. e fornecimento energético médio de 24,57 milhões tep. Por sua vez, o uso da madeira mostrou-se mais constante, utilizada principalmente para processos fornecimento de calor na indústria e o carvão vegetal e a lenha tiveram decréscimo médio 0,43% a.a., entre 1970 e 2019. Embora a biomassa florestal tenha apresentado pouca diminuição, em termos absolutos, o aumento das demais fontes fez com que sua participação decrescesse de 47,57% (31.852×10^3 tep), em 1970, para 8,75% (24.146×10^3 tep), em 2019 (EPE, 2019).

Tabela 1.3. Oferta energética por tipo de fonte no Brasil, em $\times 10^3$ tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.

Fonte	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Não renováveis	27.918	62.541	72.672	112.782	148.644	158.395
Petróleo e derivados	25.251	55.418	57.749	86.743	101.714	101.051
Gás natural	170	1.092	4.337	10.256	27.536	35.909
Carvão mineral e coque	2.437	5.902	9.598	12.999	14.462	15.480
Urânio	-	-	598	1.806	3.857	4.174
Outras não renováveis	60	129	391	978	1.075	1.780
Renováveis	39.028	52.157	69.368	77.261	120.062	135.642
Hidráulica	3.420	11.063	20.051	29.980	37.663	36.364
Lenha e carvão vegetal	31.852	31.083	28.537	23.060	25.998	25.725
Derivados da cana	3.593	9.129	18.988	20.761	47.102	52.841
Eólica	-	-	-	-	187	4.815
Solar	-	-	-	-	-	572
Outras	163	881	1.793	3.460	9.112	15.325
Total	66.946	114.698	142.041	190.043	268.706	294.036

Fonte: EPE, 2020.

A Tabela 1.4 apresenta a geração de eletricidade por tipo de fonte no Brasil, em GWh (Giga Watts hora), para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. Em 1970, o fornecimento de eletricidade nacional foi 49.455,29 GWh, onde 85,37% obtidos de fontes renováveis de energia. Em 2019, obteve-se 683.664,77 GWh, com um aumento médio de 5,62% a.a. O intervalo de maior crescimento na produção de eletricidade foi 2000 a 2010, com aumento absoluto de 124.401,61 TWh, dos quais 68,09% foram acrescidos dos recursos renováveis e 31,91% dos exauríveis devido a globalização e o progresso tecnológico das indústrias.

Embora a energia hidráulica ser a principal recurso de geração de eletricidade no Brasil, durante todo período analisado, apresentou decréscimo em sua participação, caindo de 83,25% (1970) para 58,65% (2019). Por sua vez, a biomassa apresentou aumento médio de 9,26% a.a., com participação de 2,08% (1970), 2,44% (1980), 3,05% (1990), 3,83% (2000), 9,29% (2010) e 11,53% (2019); parte do crescimento pode ser atribuído ao aumento da demanda energética industrial, as crises energéticas enfrentadas em 2001 e 2002 e ao Programa de incentivo as fontes alternativas – PROINFA.

Tabela 1.4. Geração de eletricidade por tipo de fonte no Brasil, em GWh, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.

Fonte	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Não renováveis	7.237,00	12.404,74	17.187,25	47.271,85	97.395,83	137.092,58
Gás natural	0,00	0,00	639,22	6.506,83	46.217,45	72.963,52
Carvão vapor	1.416,99	2.721,20	2.917,37	7.877,24	7.830,81	16.734,10
Óleo diesel	700,60	1.371,87	2.428,62	7.016,86	9.861,17	5.857,71
Óleo combustível	4.457,27	6.596,63	4.839,62	9.716,50	6.444,66	3.119,04
Gás de coqueria	91,74	362,79	875,52	1.107,70	2.299,50	2.758,90
Outras secundárias	0,00	30,00	379,28	3.041,39	3.484,61	5.708,69
Outras	570,40	1.322,25	2.870,62	5.959,34	6.734,48	13.821,80
Urânio	0,00	0,00	2.237,00	6.046,00	14.523,16	16.128,82
Renováveis	42.218,29	135.321,02	217.540,13	322.796,78	461.867,34	546.572,19
Lenha	109,78	403,19	1.223,04	1.426,81	2.894,89	3.854,39
Bagaço de cana	721,66	2.001,00	3.728,10	6.962,29	34.689,65	51.090,69
Licor negro	197,54	1.206,82	2.206,33	5.801,58	13.933,89	23.453,39
Biodiesel	0,00	0,00	0,00	0,00	416,64	457,23
Eólica	0,00	0,00	0,00	1,00	2.177,00	55.999,61
Solar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7.317,41
Hidráulica	41.188,91	131.710,00	209.822,00	307.790,64	407.171,74	401.030,01
Outras	0,40	0,00	560,66	814,46	583,52	3.369,46
Total	49.455,29	147.725,76	234.727,37	370.068,63	559.263,16	683.664,77

Fonte: EPE, 2020.

A Tabela 1.5 apresenta a evolução do consumo final setorial da biomassa no Brasil, em $\times 10^3$ tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019. O uso da biomassa aumentou de forma significativa para os setores energético (11,04% a.a.) e de transporte (10,78% a.a.), devido os programas de incentivo, como o Programa Nacional de Álcool (Proálcool), criado em 1975, e a busca por aumento da eficiência energética, principalmente no setor sucroalcooleiro e de celulose e papel (EPE, 2019). O uso residencial apresentou a maior queda, com -1,93% a.a., influenciado pela intensificação da urbanização nos anos de 1970 e os subsídios ao preço do GLP, a partir de 1973 (ESTEVEZ; BICALHO; OLIVEIRA FILHA, 2009). Dentre os setores industriais, os com maior crescimento foram o de ferro-ligas e ferro-gusa e aço, com aumento médio de 4,78% a.a. e 2,11% a.a., respectivamente. Estes segmentos apresentaram elevado consumo do carvão vegetal (em substituição ao coque de petróleo) e do gás de alto forno de biomassa, resultante de etapas industriais (CARVALHO; DE ASSIS, 2007).

Tabela 1.5. Evolução do consumo final setorial de biomassa no Brasil, em $\times 10^3$ tep, para 1970, 1980, 1990, 2000 e 2019.

Setores	1970	1980	1990	2000	2010	2019
Setor energético	8,92	201,28	670,65	552,27	1.277,69	1.513,92
Residencial	1.950,76	1.580,43	859,91	697,94	778,50	748,53
Comercial e público	23,90	22,90	17,33	13,86	17,72	16,48
Agropecuário	492,01	324,20	218,08	164,25	280,60	384,97
Transportes	14,13	142,50	585,75	582,02	1.358,93	2.129,01
Industrial	842,68	1.239,28	1.684,58	2.031,90	3.428,83	3.160,21
Total	3.332,39	3.510,58	4.036,30	4.042,23	7.142,28	7.953,12

Fonte: EPE, 2020.

1.3.3 Biomassa

A biomassa pode ser entendida como todo material orgânico proveniente de plantas ou animais. Para McKendry (2002), a biomassa é um produto dos sistemas agrícolas, florestais ou de vegetação aquática, bem como todos os resíduos orgânicos, com energia armazenada em suas ligações químicas. O conceito agrupa uma infinita quantidade de recursos, todavia, nem todos são adequados à produção de calor e eletricidade (WOLF, 2013).

1.3.3.1 Tipos de biomassa

Cesprini et al. (2020) afirmaram que mesmo o suprimento de biomassa envolvendo um grande número de matérias-primas, os recursos de maior importância para geração de energia podem ser classificados em biomassa florestal, agroindustrial e de resíduos urbanos.

1.3.3.1.1 Biomassa florestal

A biomassa florestal corresponde a dois terços da biomassa total disponível para produção de energia e, aproximadamente, metade de todo o potencial renovável do mundo. Os produtos energéticos das florestas incluem resíduos florestais, a lenha, resíduos de madeira urbana e resíduos de processamento industrial, como o licor negro e o gás de alto forno de biomassa (MANTAU et al., 2010; SEDJO, 1997). Woo et al. (2019) classificaram a cadeia produtiva da biomassa florestal em três níveis: primário, secundário e terciário. O primário inclui os resíduos madeireiros convencionais da retirada de madeira para fins industriais e energéticos de áreas florestais. Os resíduos do processamento industrial são as fontes secundárias. E o terceiro associa-se aos resíduos urbanos, sejam de podas, consumo humano, detritos de construção ou demolição.

Os subprodutos de biomassa florestal variam de acordo com a localização geográfica dos países. No continente americano, de forma geral, a biomassa florestal mais utilizada são os resíduos madeireiros, gerados por operações de colheita comercial da madeira, retirada de material com risco de incêndio, corte de madeira, recuperação de madeira e restauração florestal (GHAFARIYAN; ACUNA; BROWN, 2013; KIZHA; HAN, 2015). A biomassa dos resíduos pode ser utilizada na produção de painéis de partículas ou destinada à geração de energia, na forma de calor e eletricidade (WOLF, 2013).

1.3.3.1.2 Agroindustrial

Wolf (2013) afirmou que o produto final de todas as plantações agroindustriais é a biomassa, na forma de palhas, bagaços, cascas, grãos e nozes. Magalhães Júnior et al. (2019) apontaram que a biomassa das plantações é formada basicamente por celulose, hemicelulose e lignina, o que combinado com o baixo teor de umidade, após secagem, a

torna uma fonte de produção de calor e eletricidade. Todavia, o alto teor de cinzas e compostos de cloreto e potássio (sais) tendem a ser um problema na combustão em caldeiras, gerando escórias e corrosão, o que faz com que sejam queimados a temperaturas mais baixas. Nogueira e Lora (2002) classificaram a biomassa agroindustrial entre as culturas agroenergéticas e os resíduos de atividades agrícolas e da produção animal. As plantações com finalidade energética fornecem rendimento maximizado de energia, a partir de rotações curtas (2 a 3 anos de ciclo). Este processo envolve a espécies de alto rendimento calorífico e com propriedades químicas otimizadas para conversão em energia (WOLF, 2013).

As culturas que fornecem maior quantidade de resíduos energéticos, na América, são a cana-de-açúcar, soja e milho, com mais de 1 bilhão de toneladas de produto, que representa 80% da produção agrícola do continente. O processamento dessas culturas gera grandes quantidades de resíduos sólidos, incluindo resíduos de campo ou agrícolas (palha, folhas e folhagem) e resíduos de processamento agroindustrial (bagaço, cachos e cascas), os quais podem ser utilizados para geração de eletricidade (CARVALHO; VEIGA; BIZZO, 2017; MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2019). Quanto aos resíduos da produção animal estão os excrementos de gado bovino, suíno, caprino e ovino (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Este material é utilizado para produção de biogás a partir da digestão anaeróbia e pode ser utilizado para combustão, em casos de esterco com maior granulometria (suínos e bovinos) (NIKOLAISEN; JENSEN, 2013).

1.3.3.1.3 Biomassa de resíduos

A biomassa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são subprodutos das populações e considerado um desafio de gestão para a sociedade. Os RSU são compostos do lixo gerados nas cidades e dos resíduos urbanos do esgoto, os quais destacam-se pelo grande teor de matéria orgânica residual (GONÇALVES; SARTORI; LEÃO, 2009). Segundo Rentizelas (2019), nos últimos anos, os RSU apresentaram utilização na produção de energia, a partir da combustão direta, pirólise, gaseificação ou mesmo do biogás proveniente de aterros. Cabe ressaltar, no entanto, que apenas a fração biogênica dos RSU é considerada renovável, referindo-se principalmente a papel, papelão, madeira, alimentos, couro, tecidos e aparas de jardim.

1.3.3.2 Processos de conversão da biomassa

Dentre as diversas definições para a biomassa, do ponto de vista técnico químico, Brown (2007) a caracteriza como toda matéria orgânica caracterizada como combustível sólido carbonáceo, com elevada capacidade volátil e valor de aquecimento médio de 18 MJ/kg. A conversão da biomassa em eletricidade pode ser realizada a partir de diferentes processos, como mostrado na Figura 1.1.

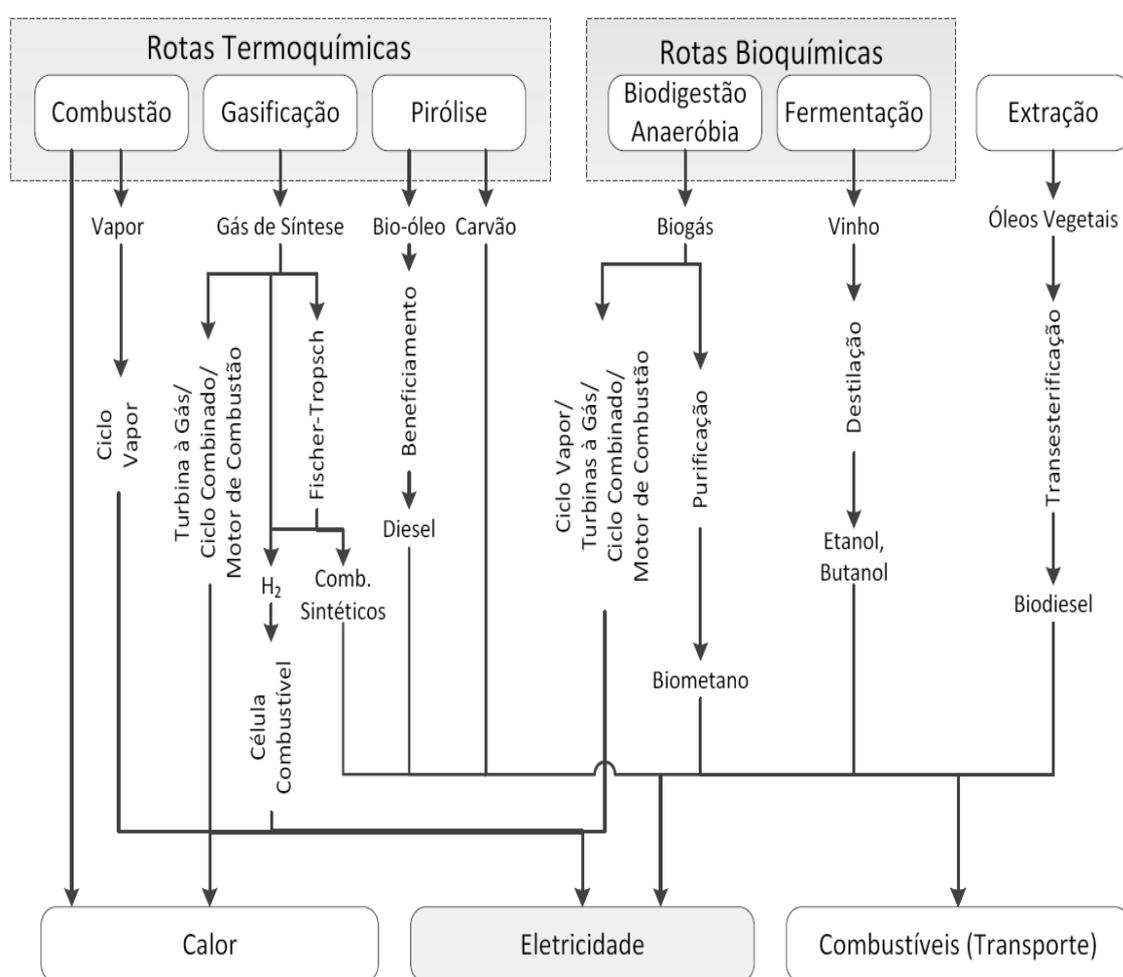


Figura 1.1. Rotas de conversão energética da biomassa.

Fonte: Tolmasquim, 2016.

Os processos termoquímicos são os mais usuais, destacando-se a combustão direta, gaseificação térmica e a pirólise. A combustão direta libera calor, o qual pode ser usado nos motores *Stirling* ou nos ciclos de potência a vapor Rankine, a gaseificação gera gases inflamáveis para queima em motores de combustão interna, turbinas a gás ou células de

combustível, enquanto a pirólise é indispensável para a bioeletricidade a partir do carvão vegetal e do gás de alto forno (BROWN, 2007).

1.3.3.2.1 Combustão direta

De acordo com Brown (2007), a combustão é a rápida oxidação de determinado combustível, na presença de oxigênio, e que objetiva a geração de energia na forma de calor. Devido a composição da biomassa (carbono, hidrogênio, oxigênio e outros elementos em menor proporção), os principais produtos da combustão são o dióxido de carbono e água, resultando em uma menor emissão de gases do efeito estufa, quando comparado a outras fontes de energia.

O teor de umidade do combustível influencia diretamente na quantidade de ar usada na queima e na construção do forno, tendo em vista que as temperaturas de chama podem chegar até 1900°C (THUMANN; MEHTA, 2008). Segundo Mandø (2013) existem duas técnicas principais para a combustão da biomassa: grelha fixa e combustível pulverizado. No processo de grelha fixa toda a biomassa é alocada em uma grade e lentamente direcionada para a caldeira. No interior desta, o ar é fornecido por pequenos orifícios da própria grelha, o que permite o uso de biomassa com matéria particulada grande e desigual. Normalmente, este processo é utilizado em plantas de até 150 MWt (Mega Watts térmicos) ou 30 MWe (Mega Watts elétrico), sendo necessária a instalação de caldeiras em série para elevação do potencial (MANDØ, 2013).

Para o processo de combustível pulverizado, a biomassa é moída e posteriormente queimada em grandes chamas. Esse mecanismo resulta em uma alta eficiência da combustão, conseqüentemente a potência gerada atinge valores elevados, podendo ser aplicado em larga escala (até 600 Mwe) (MANDØ, 2013).

1.3.3.2.2 Gaseificação

A operação comercial da gaseificação data o ano de 1812, quando foi realizada a conversão do carvão em gás para iluminação, na Inglaterra, seu uso foi importante até a metade do século XX em países industrializados, até a chegada dos combustíveis fósseis, mais baratos e acessíveis. A partir de 1973, com a crise do petróleo, foram instalados mais

de 12.000 gaseificadores de 1MW na América do Norte, muitos deles passaram a ser utilizados nos países emergentes (SANSANIWAL et al., 2017).

A gaseificação ocorre quando a biomassa é levada a altas temperatura (750°C a 850°C) em misturas de gases inflamáveis, conhecido como gás produtor, consistindo em monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄), nitrogênio (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e quantidades menores de hidrocarbonetos mais altos. O processo é endotérmico e requer a queima simultânea de parte do combustível ou a entrega de uma fonte externa de calor para conduzir o processo (MANDØ, 2013) .

Devido a essa flexibilidade de aplicação, a gaseificação foi proposta como base para “refinarias de energia” que forneceriam uma variedade de produtos energéticos e químicos, incluindo eletricidade e combustíveis para transporte. Os gaseificadores são geralmente classificados de acordo com o método de contato com o combustível e gás. As quatro classes de gaseificadores são corrente ascendente (contracorrente), corrente descendente (simultânea), leito fluidizado e fluxo arrastado (BROWN, 2007).

Os gaseificadores ascendentes, são os mais simples e o primeiro tipo desenvolvido, tendo sido uma evolução natural dos fornos a carvão, que produzem gás esfumaçado e inflamável como resíduos e altos-fornos. Os gaseificadores de corrente simultânea, o combustível e o gás se movem na mesma direção, estes foram desenvolvidos no final do século XIX. No processo, o ar é puxado para baixo, na mesma direção que o combustível e alimentado por gravidade (BROWN, 2007).

Os leitos fluidizados são atraentes para a gaseificação de biomassa, pois são capazes de processar uma ampla variedade de combustíveis, incluindo aqueles com alto teor de umidade e pequeno tamanho de partícula. Também são adequados para geração de eletricidade, porém apresentam consumo de energia relativamente alto. O gaseificador de fluxo arrastado utiliza biomassa pulverizada em seu reator e garante uma potência otimizada (HENRICH; WEIRICH, 2004).

1.3.3.2.3 Pirólise

O processo da pirólise trata-se de uma etapa da produção de bio-óleo e carvão vegetal (TOMALSQUIM, 2016). A pirólise é uma série complicada de reações químicas, termicamente acionadas e que decompõem compostos no combustível. O processo ocorre a baixas temperaturas e o fornecimento de oxigênio, em condições sub estequiométricas, é

dependente do tipo de material vegetal, pois componentes da biomassa começam a pirolisar em temperaturas distintas. A hemicelulose começa a pirolisar a temperaturas entre 150 e 300°C, a celulose a 275°C-350°C e a lignina entre 250 e 500 °C, fazendo com que o processo seja diferente para cada tipo de biomassa (KUMAR; PRATT, 1996).

Segundo Brown (2007), pirólise é um processo rápido em comparação com combustão, todavia, o tempo depende do tamanho da matéria a ser pirolisada, que pode variar de pequenos resíduos a toras completas de madeira. O autor classifica o processo como o de maior necessidade de calor. O resultado da pirólise é um resíduo carbonoso poroso conhecido como *char*.

1.3.4 Setor florestal

O setor florestal compreende a relação de produção, comércio e uso final dos recursos silvestres ou florestal, relacionando-se à fauna (exceto peixe) e aos recursos da flora, seja de florestas naturais ou plantadas (CARVALHO; SOARES; VALVERDE, 2005). O setor destaca-se por sua importância econômica, sendo objeto de investimentos e transações comerciais de elevado valor, em nível mundial (JUVENAL; MATTOS, 2002).

A produção florestal é a transformação da matéria prima das florestas, em produtos, madeireiros ou não-madeireiros, dividindo-se em três categorias: a produção de florestas plantadas, florestas nativas e atividades de apoio. Esta divisão engloba o cultivo de espécies florestais, produção de madeira em toras e de produtos florestais não-madeireiros, de mudas florestais, os produtos da madeira resultantes de pequeno processamento (lenha, carvão vegetal, lascas de madeira e outros) e a madeira não processada (moirões, estacas e postes) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2020).

1.3.4.1 Setor florestal mundial

As florestas são um dos recursos renováveis com maior disponibilidade no mundo. Em 2016, a cobertura florestal mundial foi 39,99 milhões de km², que representava 26,72% da extensão territorial. Entre os países com maior área florestal estiveram a Rússia com 8,15 milhões de km², seguida do Brasil (4,93 milhões de km²), Canadá (3,47 milhões de km²) e Estados Unidos (3,10 milhões de km²) (WORLD BANK, 2019).

A Figura 1.2 apresenta a produção madeireira continental no mundo (x10⁶ m³), de 1970 a 2019. Em escala global, a produção de madeira, para diversos fins, apresentou

média de $3.682,90 \times 10^6 \text{ m}^3$ e incremento médio anual de 0,69%, partindo de $2.818,82 \times 10^6 \text{ m}^3$ (1970) para $3.964,35 \times 10^6 \text{ m}^3$ (2019). Entre os continentes, a Ásia apresentou a maior produção média com $1.121,13 \times 10^6 \text{ m}^3$, com aumento de 0,24% a.a. A região com maior crescimento na produção foi a Oceania, com aumento de 12,35% a.a., porém apresentou a menor média de produção com apenas $51,02 \times 10^6 \text{ m}^3$.

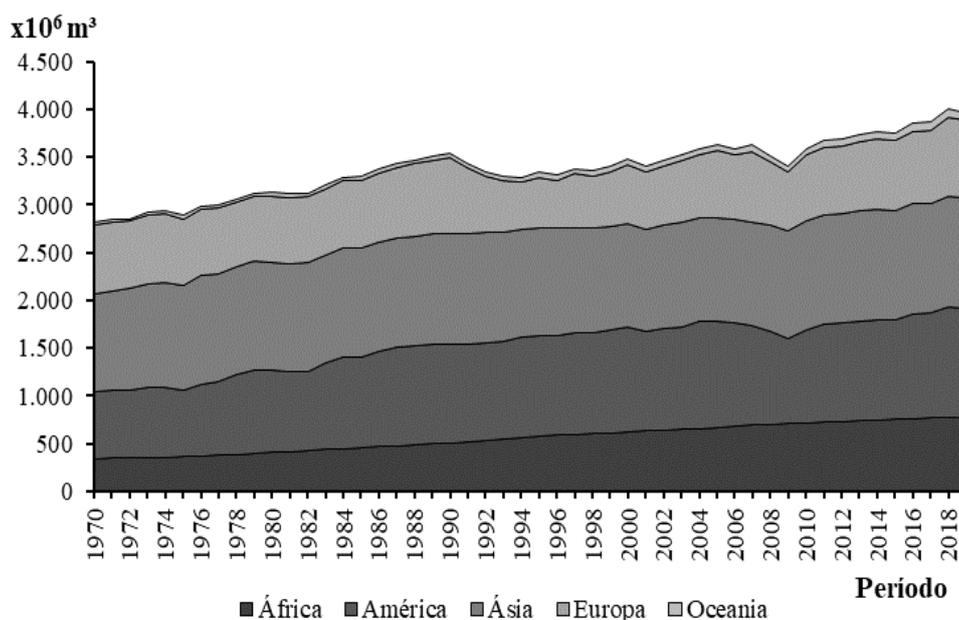


Figura 1.2 Produção madeireira continental no mundo ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de 1970 a 2019.

Fonte: FAO, 2020.

A Tabela 1.6 apresenta a produção madeireira dos 10 maiores países com base em 2019 ($\times 10^6 \text{ m}^3$), para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019. Entre os dez países com maior produção estiveram 3 países da Ásia (Índia, China e Indonésia), 3 da América (Estados Unidos, Brasil e Canadá), 3 da África (Etiópia, Congo e Nigéria) e 1 da Europa (Rússia, que apresenta parte de seu território nos continentes da Europa e da Ásia). Em 2019, os Estados Unidos foi o país com maior produção madeireira. A média americana foi $427,96 \times 10^6 \text{ m}^3$ e crescimento médio de 0,56% a.a., motivado pelo elevado consumo para geração de energia (GOERNDET; AGUILAR; SKOG, 2013).

Em 2019, a produção do Estado Unidos foi 459,13 milhões de m^3 , sendo destinado 15,56% para uso como combustível e 84,44% para uso industrial (48,28% da madeira em tora, 48,21% para indústria de celulose e 0,35% para outros usos industriais). Os países com maior crescimento médio produtivo foram o Congo (2,58% a.a.) e Brasil (1,75% a.a.), com produção média de $57,67 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $203,54 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente. Em 2019, a

produção madeireira, do Brasil, alcançou $281,52 \times 10^6 \text{ m}^3$, destinada principalmente para o uso energético (43,85%), seguida da madeira para celulose (32,92%), madeira em tora (20,04%) e outros usos industriais (3,19%).

Tabela 1.6. Produção madeireira dos 10 maiores países com base em 2019 ($\times 10^6 \text{ m}^3$), para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019.

Países	1970	1980	1990	2000	2010	2019
1° Estados Unidos	348,47	398,17	509,32	466,55	376,57	459,13
2° Índia	200,12	251,56	311,29	318,55	358,07	352,86
3° China	339,17	395,64	378,56	323,65	350,63	344,71
4° Brasil	119,84	167,44	194,58	235,40	235,43	281,52
5° Rússia	0,00	0,00	0,00	158,10	175,50	218,40
6° Canadá	121,63	155,62	162,13	201,85	142,01	145,17
7° Indonésia	212,48	196,68	164,41	137,83	113,85	116,32
8° Etiópia	0,00	0,00	0,00	89,93	104,21	114,81
9° Congo	25,80	34,46	47,24	68,47	81,13	90,24
10° Nigéria	42,09	49,51	59,18	68,77	72,63	76,23
- Outros	1.411,64	1.481,74	1.717,57	1.417,35	1.577,76	1.764,97
Mundo	2.818,82	3.129,01	3.542,58	3.484,86	3.586,24	3.964,35

Fonte: FAO, 2020.

A Tabela 1.7 apresenta a produção de madeira para uso combustível ($\times 10^6 \text{ m}^3$) dos 10 maiores países, com base em 2018, para 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019. A produção mundial apresentou aumento para esta finalidade, com média de $1.781,40 \times 10^6 \text{ m}^3$, o acréscimo foi de 0,47% a.a. A Índia, China e Brasil foram os países com maior produção de madeira para energia, denotando a importância do setor florestal para matriz energética de países em desenvolvimento (BRITO, 2007). A produção média na Índia foi 269,72 milhões de m^3 , que representou 88,78% de toda madeira produzida pelo país, entre 1970 e 2019. O único país desenvolvido entre os maiores produtores foram os Estados Unidos, com produção média de $57,91 \times 10^6 \text{ m}^3$, que correspondeu a 13,33% da produção total. Todos os demais países do ranking apresentam economia subdesenvolvida. Gana foi o país com maior crescimento médio (3,77% a.a.), com média $22,99 \times 10^6 \text{ m}^3$.

1.3.4.2 Setor florestal no Brasil

O setor florestal brasileiro apresenta elevado potencial produtivo, devido as condições físicas e naturais convenientes ao desenvolvimento das florestas, como a elevada

extensão territorial, disponibilidade de mão de obra, clima e solo propícios e tecnologia avançada (SOUSA et al., 2010). Em 2018, 495,85 milhões de hectare (ha), do território brasileiro apresentava-se coberto por florestas, embora nem todas fossem passíveis de exploração (IBÁ, 2019). Das florestas nacionais, 98,42% são nativas e 1,58% da silvicultura, sendo que os biomas e espécies que participam desta composição no território brasileiro, em 2018, são apresentados na Figura 1.3.

Tabela 1.7. Produção de madeira para uso combustível ($\times 10^6$ m³) dos 10 maiores países, com base em 2019, para os anos de 1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2019.

	Países	1970	1980	1990	2000	2010	2019
1°	Índia	187,42	231,88	276,24	277,38	309,31	303,34
2°	China	297,02	316,44	287,34	227,63	188,82	163,01
3°	Brasil	95,90	105,72	120,30	132,41	107,03	123,44
4°	Etiópia	0,00	0,00	0,00	87,47	101,27	111,88
5°	Congo	23,86	32,24	44,18	64,90	76,60	85,62
6°	Estados Unidos	35,82	71,08	82,12	45,93	40,44	71,43
7°	Nigéria	38,93	42,15	50,92	59,35	63,21	66,21
8°	Gana	7,75	9,65	12,87	26,73	37,79	47,64
9°	Uganda	18,68	25,77	29,27	34,09	39,64	43,73
10°	Indonésia	199,81	165,76	126,04	88,98	59,74	42,28
-	Outros	637,19	681,62	803,81	750,36	839,24	885,88
	Mundo	1.542,39	1.682,30	1.833,08	1.795,22	1.863,10	1.944,45

Fonte: FAO, 2020.

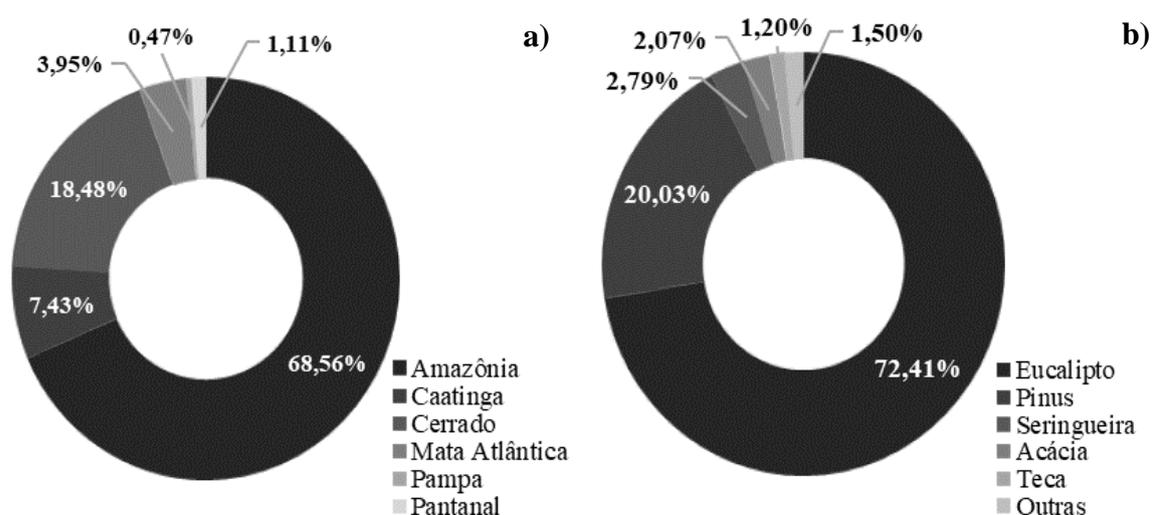


Figura 1.3. Participação dos biomas (a) e das espécies plantadas (b) no território brasileiro, em 2018.

Fonte: IBÁ, 2019.

Das florestas naturais, o maior destaque é para região amazônica com 3.346.120 km² de cobertura vegetal, em seguida estiveram o cerrado (902.078 km²) e caatinga (362.688 km²), sendo apenas pequenas reservas disponíveis para utilização através de planos de manejo florestal sustentável (PMFS). Para as florestas plantadas destacou-se a produção do eucalipto (*Eucalyptus*) com área de cobertura de 56.724 km², correspondente a área do estado da Paraíba. Os estados com maior número de plantios foram Minas Gerais (24,06%), São Paulo (16,51%) e Mato Grosso do Sul (15,90%). Em seguida ao eucalipto estiveram as florestas de pinus (15.693 km²), seringueira (2.183 km²) e acácia (1.619 km²) (IBÁ, 2019).

A Figura 1.4 apresenta a evolução da produção anual de madeira, por tipo de floresta (extrativismo vegetal e silvicultura), no Brasil, de 1998 a 2017. A produção madeireira nacional aumentou de 217,95 milhões de m³, em 1998, para 271,86 milhões de m³, em 2017, com média de 247,75 milhões de m³ e crescimento médio de 1,17% a.a. Quanto a exploração dos recursos da madeira no Brasil, em 2017, 13,67% da madeira utilizada no país foi do extrativismo vegetal (florestas nativas) e 86,33% da silvicultura (florestas plantadas) (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF, 2019).

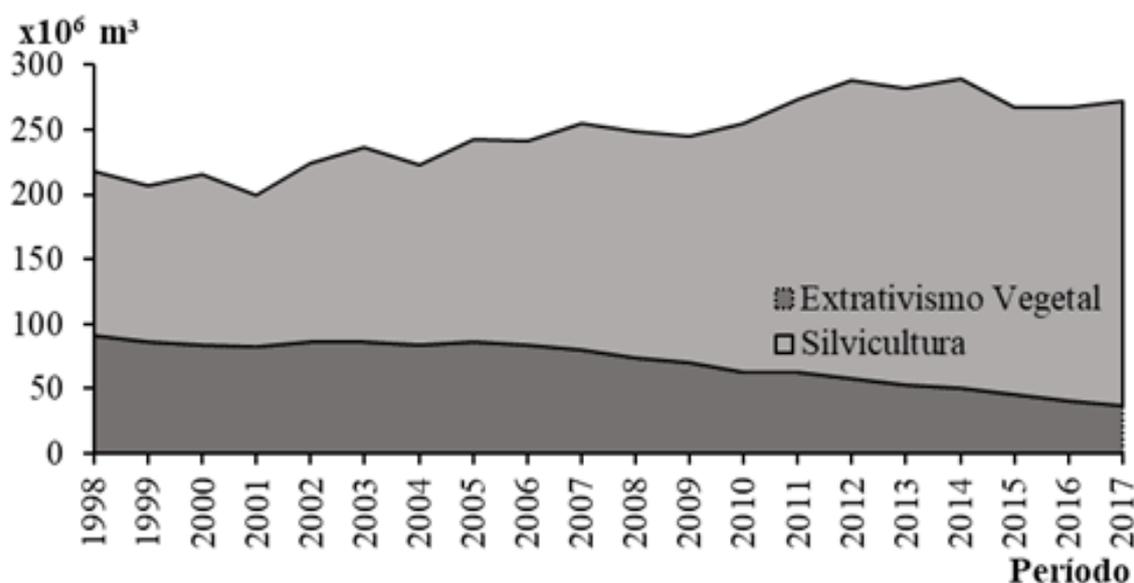


Figura 1.4. Evolução da produção anual de madeira, por tipo de floresta (extrativismo vegetal e silvicultura), em milhões de metros cúbicos (x10⁶ m³), no Brasil, de 1998 a 2017.

Fonte: SNIF, 2020.

A maior produção foi registrada em 2012, 287,94 milhões de m³, que foi considerado um cenário atípico por Zerbini (2014). O extrativismo vegetal decresceu para o mesmo período com uma taxa média de -4,59% a.a., a média de produção foi 140,47 milhões de m³ e a queda mais intensa ocorreu entre 2006 e 2017 (-7,06% a.a.). A produção de madeira da silvicultura apresentou aumento significativo para o período (3,28% a.a.), crescendo de 127,18 milhões de m³, em 1998, para 234,69 milhões de m³, em 2017. Cerca de 35% da área de florestas plantadas são destinadas às indústrias de papel e celulose, 30% para produtores independentes, 13% para empresas de siderurgia e 22% para outras atividades (IBÁ, 2019).

O produto madeireiro mais comum no país Brasil foi a lenha através do extrativismo vegetal e a madeira em tora para a silvicultura (Figura 1.5). No extrativismo vegetal a produção média foi 58,33% da madeira para lenha, 24,16% para a madeira em tora e 17,51% carvão vegetal. A partir da silvicultura, o recurso com maior média de produção foi a madeira em tora com 59,01%, seguida da lenha com 25,01% e do carvão vegetal com 15,97%.

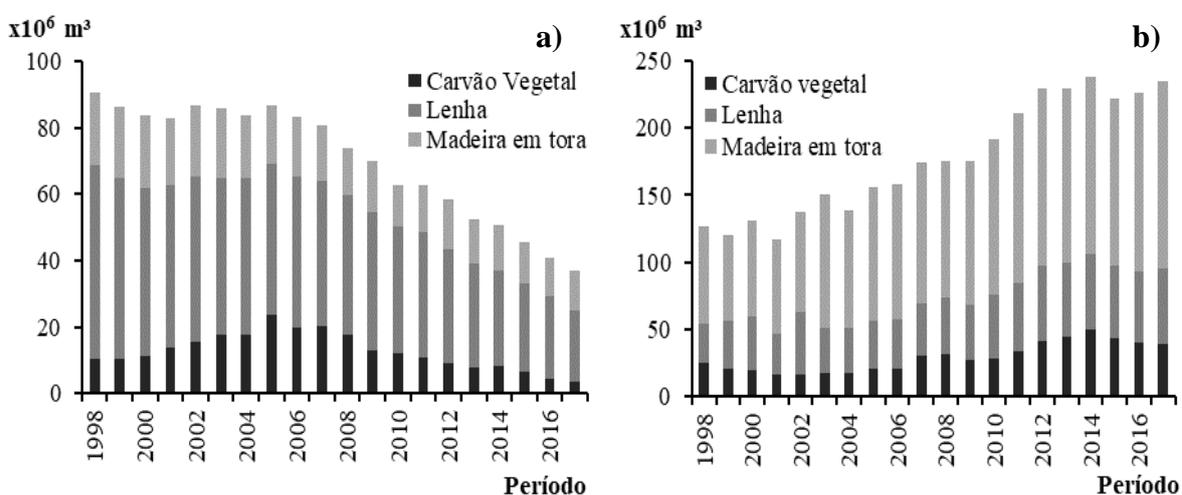


Figura 1.5. Evolução da produção anual de madeira por tipo de produto no Brasil ($\times 10^6 \text{ m}^3$), de 1998 a 2017. a) extrativismo vegetal e b) silvicultura

Fonte: SNIF, 2020.

A finalidade da madeira e o potencial de resíduos energéticos é apresentada na Figura 1.6. De acordo com a EPE (2018) até 50% da madeira utilizada no setor industrial pode ser reaproveitada como recurso energético, todavia este potencial ainda é pouco utilizado. A destinação da madeira para uso combustível apresentou decréscimo médio

(-0,1% a.a.), enquanto o uso para fins industriais aumentou a uma média de 2,52% a.a. Em 1998, 123,20 milhões de m³ (56,53%) da madeira produzida foi direcionada ao uso combustível e 94,74 milhões de m³ (43,47%) ao segmento industrial, o que rendeu de 49,26 milhões de m³ de resíduos com potencial de reuso. A partir de 2010, o uso industrial superou a destinação da madeira para combustível e este aumento propiciou um crescimento na produção de madeira da silvicultura. Em 2017, 55,93% da madeira foi destinada às indústrias, o que rendeu 79,07 milhões de m³ de madeira residual energética.

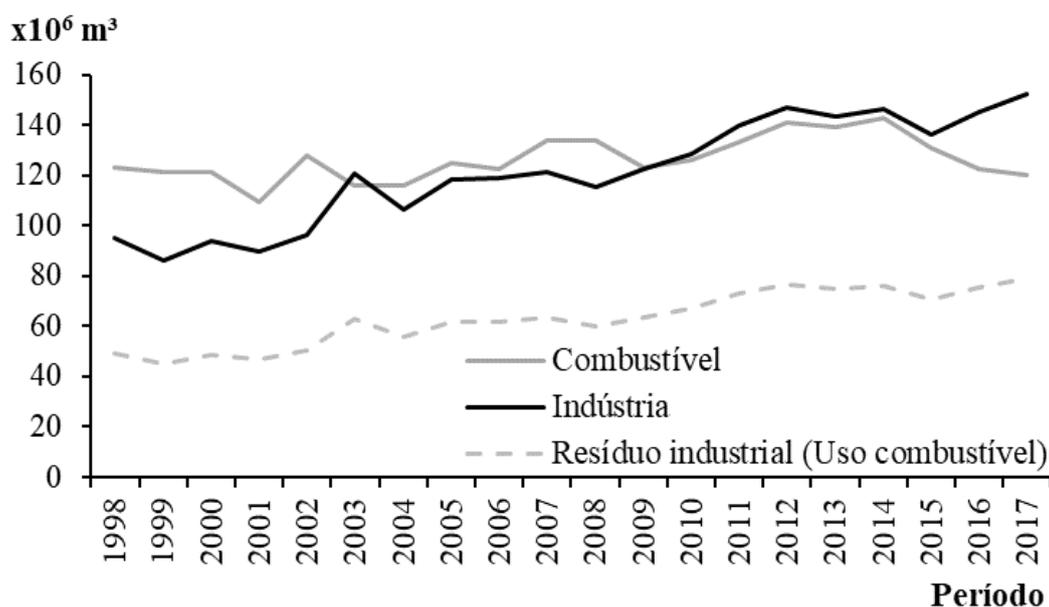


Figura 1.6. Evolução da produção madeireira por finalidade de uso no Brasil (x10⁶ m³), de 1998 a 2017.

Fonte: SNIF, 2020.

1.3.5 Biomassa florestal para eletricidade

A biomassa florestal para geração de energia pode impactar sob diferentes níveis geográficos. Em nível local, pode substituir o consumo de combustíveis fósseis, no aquecimento e no fornecimento de eletricidade. Em escala nacional ou global, diminui consideravelmente a dependência dos combustíveis fósseis, diversificando a matriz energética e elétrica (WOLF, 2007). A eletricidade pode ser obtida a partir de diversos produtos da madeira. A ANEEL (2020) classifica a biomassa florestal (fonte nível 1) para eletricidade em seis subníveis (fonte nível 2), de acordo com o Quadro 1.1.

Quadro 1.1. Classificação da biomassa florestal (fonte nível 2).

Biomassa Florestal	Lenha
	Carvão Vegetal
	Biogás Floresta
	Gás de Alto Forno (Biomassa)
	Licor Negro
	Resíduos florestais

Fonte: ANEEL, 2020.

A lenha foi uma das primeiras fontes de energia utilizadas pela humanidade, com objetivo principal de gerar calor e mostrou-se muito participativa na matriz energética mundial, usada principalmente em processos industriais. Nas últimas décadas, o uso da lenha variou de acordo com desenvolvimento econômico de cada país, das questões ambientais, disponibilidade de florestas e competição com outras fontes de energia, sendo cada vez mais utilizada para a eletricidade (BONASSA et al., 2018).

Miranda, Bailis e Vilela (2013) destacaram a cogeração de eletricidade do carvão vegetal, como uma tecnologia promissora para aplicação mundial. O uso do carvão para gerar potência elétrica pode proporcionar vantagens comparativas a outras fontes de energia, como oportunidades empreendedoras, diversificação de meios de subsistência, aumento da renda nas áreas rurais, redução de emissões de gases de efeito estufa e diversificação da matriz elétrica. Além da eletricidade a partir da combustão do carvão vegetal (comum no setor siderúrgico), o processo controlado de pirólise também pode realizar cogeração, com potencial de 500 a 600 kWh de energia por tonelada de carvão produzido, entretanto, há uma necessidade de alto investimento tecnológico (MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013; SAMPAIO, 2008).

O biogás florestal apresenta pouco uso na oferta da bioeletricidade, principalmente no Brasil, onde há apenas uma usina termelétrica instalada. Este, é um recurso importante na cadeia energética da biomassa por sua alta eficiência energética e pelas diversas formas de obtenção (MURPHY; POWER, 2009). As grandes porções de lignocelulose presente na biomassa florestal o tornam um recurso potencial. Todavia, as dificuldades tecnológicas associadas a estrutura recalcitrante das lignocelulose, à cristalinidade da celulose e à presença de lignina, são limitações para a hidrólise, primeira etapa da degradação

anaeróbia, demonstrando necessidade de avanço técnico para seu uso em escala industrial (KABIR et al., 2015).

O gás de alto forno de biomassa é obtido da gaseificação do carvão vegetal nos fornos das indústrias siderúrgicas e pode ser utilizado como combustível para geração de calor e eletricidade (EPE, 2009). Em geral, as termelétricas de gás de alto forno funcionam com um queimador seco de biomassa, em paralelo, para viabilização do uso. No Brasil, o gás de alto-forno movido a biomassa é usado principalmente no Estado de Minas Gerais (PEDROSO et al., 2018).

O licor negro (também chamado lixívia) é um subproduto do segmento industrial de papel e celulose, um líquido denso e de cor preta, composto na base seca, por 60% de matéria orgânica (RAMESH et al., 2013). Trata-se de um resíduo com elevada alcalinidade, que pode ocasionar impactos ambientais, assim seu uso torna-se econômico e ambientalmente viável, podendo ser utilizado como combustível em caldeiras de combustão para geração de energia elétrica (NAQVI; YAN; DAHLQUIST, 2010). Larson et al. (2000) destacou que uma fábrica de celulose produz de 1,7 a 1,8 toneladas de base seca do licor negro por tonelada de celulose, o que representaria uma energia potencial de 250 a 500 MW para uma produção de 1000 a 2000 toneladas de celulose seca ao ar (Adt) por dia.

Os resíduos florestais são compostos de partes de árvores (copas e galhos), madeira de pequeno diâmetro, tocos, madeira morta e espécies rasteiras de baixo valor econômico. Os resíduos podem representar até 50% da biomassa total da floresta, todavia ainda são subutilizados (ROSILLE-CALLE, 2007). A preparação dos resíduos de madeira envolve remoção de sujeiras, desidratação, peneiramento, redução de tamanho, armazenamento a granel, mistura e secagem antes da combustão, de modo a garantir um fornecimento confiável e consistente de combustível de qualidade aos queimadores (DEMIRBAS, 2009).

Os principais limitantes do uso de resíduos florestais para o fornecimento de eletricidade estão no manuseio, tratamento, armazenamento, conteúdo energético e principalmente os custos de transporte. A geração a partir dos resíduos de madeira torna-se mais atraente à medida que os preços dos combustíveis tradicionais aumentam ou para aplicações próximas a obtenção do recurso (DEMIRBAS, 2009).

Incluso na categoria de resíduos florestais da ANEEL, também encontram-se os resíduos florestais industriais. Dentre os produtos residuais das indústrias, estão: cavaco, serragem, licor negro, aparas de papel, cinzas de caldeira e compostos químicos; os quais

podem ser destinados para geração de energia (cavaco, serragem e licor negro) a partir da queima em caldeiras, reutilizados como matéria prima (aparas de papel e cinza de caldeira) ou encaminhados para aterros legais (compostos químicos).

Além da classificação da ANNEL, outro tipo de biomassa para eletricidade são os briquetes, amplamente utilizados nos segmentos industriais, trata-se de um material renovável com finalidade apenas energética. Além da elevada densidade de energia em seu conteúdo, os briquetes contam com elevada resistência a compressão, durabilidade e baixo custo de produção (DINESHA; KUMAR; ROSEN, 2019). Briquetes, de alta qualidade, podem ser produzidos a partir da casca de arroz, espigas de milho, refugo de azeitona, papel usado, palha de trigo, pedúnculo de algodão, bagaço, carvão, resíduos florestais, lenhito e casca de palmeira (OLUGBADE; OJO; MOHAMMED, 2019).

Dinesha, Kumar e Rosen (2019) destacam que os principais insumos utilizados na fabricação dos briquetes são de duas categorias: resíduos de colheitas agrícolas e resíduos madeireiros. O material residual de colheitas agrícolas engloba cascas de grãos, palha de arroz, trigo, coco e outros; enquanto os da madeira estão as lascas de madeira, resíduos de papel, serragem, etc.

A biomassa densificada também pode ser utilizada na forma de *pellets*, que são pequenos blocos de madeira em formato cilíndrico (2 a 3 cm de comprimento). A produção dos *pellets* utiliza serragem de madeira, gramíneas e desperdício de colheitas energéticas, submetidos a elevadas pressões e temperaturas, a fim de que a lignina se torne um composto aglutinante (BONASSA et al., 2018). Segundo Guo, Song e Buhain (2015) o processo de pelletização pode elevar o potencial energético da biomassa natural de 9 para 18 MJ m³, com redução de volume de até dez vezes.

1.3.6 Economia Regional e Espacial

A Economia Regional está associada à identificação de elementos relevantes para a compreensão dos processos produtivos de uma região. Segundo Souza (1981) os estudos regionais foram negligenciados das análises econômicas tradicionais (teoria clássica e neoclássica), tendo em vista que as análises consideravam um mundo estático e sem dimensões, apenas com variação temporal.

As análises regionais foram iniciadas no século XIX, tendo sido classificadas em dois grupos teóricos. O primeiro deles abordou um conjunto de conceitos clássicos da

localização, a partir da introdução da teoria da localização agrícola apresentada por Thünen (1826) e que se estendeu até aos ensaios de Isard (1956), em sua obra sobre o espaço e a localização na economia. O segundo grupo reuniu um conjunto de princípios de desenvolvimento regional, norteados pelos fatores de aglomeração, reconhecidos nos estudos de Hirschman (1958), Myrdal (1957), North (1959) e Perroux (1955) (MONASTÉRIO; CAVALCANTE, 2011).

Os estudos clássicos, também chamados de teorias neoclássicas da localização, procuram abordar os aspectos regionais através da determinação de localizações ótimas, considerando os custos de transporte e desprezando as externalidades decorrentes da aglomeração de atividades regionais. Por sua vez, as análises que envolvem os fatores de aglomeração tratam das externalidades resultantes da relação entre firmas localizadas próximas umas das outras. Marshall (1920) destacou que em regiões conglomeradas há três características indispensáveis: a mão de obra qualificada, os fornecedores de bens e serviços e o acesso à tecnologia (CAVALCANTE, 2008). Os principais autores e sua nacionalidade para a economia regional é apresentado na Figura 1.7.

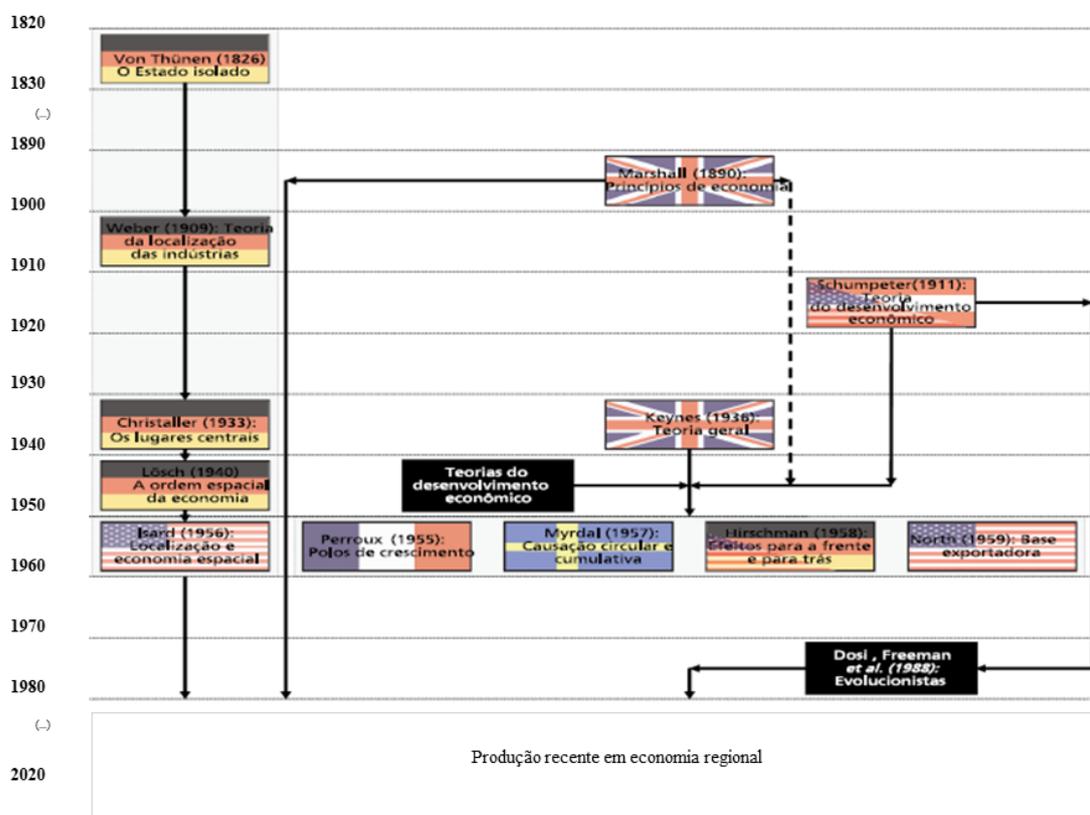


Figura 1.7. Evolução das principais teorias em economia regional.

Fonte: Adaptado de Monastério e Cavalcante, 2011.

Na atualidade, diversos economistas detalharam as questões espaciais, para identificar as causas de padrões de localização ou para avaliação de seus efeitos (ZHENG; LIN, 2018). Souza (1981) destacou que as análises regionais e locais fornecem suporte para compreender estruturas de parques industriais locais e regionais; dos meios de comunicação entre dois ou mais centros urbanos; de empregos; de finanças municipais e regionais e do aproveitamento de recursos naturais, podendo ser aplicado em outros diversos setores, como o energético.

A observação da localização de atividades e dos fatores econômicos são determinantes para o entendimento do desenvolvimento de regiões (HARIHARAN; BISWAS, 2019). De acordo com Thisse (2011), a economia espacial poder ser considerada um mecanismo que motiva troca para diferentes economias de escala e custos de mobilidade, seja de bens, pessoas ou informação. Os primeiros estudos que associaram o espaço e a economia foram observados por Marshall (1920), na Inglaterra, a partir da teoria dos rendimentos crescentes de escala. Estes rendimentos foram entendidos como economia “externa”, que reflete as vantagens de uma aglomeração espacial no desenvolvimento industrial e econômico de uma região.

Os trabalhos precusores de Von Thünen (1826), Weber (1929), Christaller (1933) e Lösch (1940) atribuíram aos aspectos geográficos o controle das forças de equilíbrio de mercado, destacando as despesas de transporte para mercados físicos. Von Thünen a partir do trabalho “O Estado Isolado” apontou que áreas produtivas próximas a demanda apresentam baixos custos de transporte e valores mais elevados de custo da terra, sendo o oposto verdadeiro. Assim, a teoria da localização tinha foco em buscar uma zona ótima para otimização de produção e custos (RÍOS, 2010; THISSE, 2011). Alonso (1964) adaptou o conceito criado por Thünen para o contexto urbano, sendo a demanda associada a um centro de emprego. A distância ao centro da cidade tornou-se a principal característica espacial para escolha do local de produção (moradias, fábricas e serviços), a partir deste ponto o objetivo tornou-se explicar a estrutura interna de cidades.

A partir da década de 1950, a pesquisa econômica regional tomou mais força e passou a destacar a importância dos fatores locais sobre as vantagens comparativas de determinados processos, conforme idealizado por Marshall, em 1920. Outros cientistas que contribuíram para os estudos do espaço associado a economia foram: Porter (1990), Scott (2005) e Krugman (1991), precursor da nova geografia econômica. Conforme Allen Scott, empresas ou atividades econômicas agrupadas espacialmente geram economia de custos a

partir de múltiplas vantagens de um mercado concentrado de forma espacial (SCOTT, 2005). Porter (1990), também apontou que a produção de bens e serviços dos setores inseridos em conglomerados espaciais (*clusters*) otimiza a produtividade e promove o desenvolvimento sustentável.

Para Almeida (2012), de forma geral, os estudos econômicos convencionais falhavam ao explicar eventos associados ao espaço. Para tal, o autor ressalta a importância das medidas que trabalham com os efeitos da autocorrelação e heterogeneidade espacial, como a análise exploratória de dados espaciais (AEDE), que engloba a compreensão da relação entre economias e o espaço, seja ele, nacional, regional ou estadual. Assim como, a análise de *clusters*, ou seja, a identificação de concentrações geográficas de empresas interconectadas, especializadas, fornecedores, prestadores de serviços, empresas em indústrias relacionadas e instituições associadas em um campo específico que competem, mas também cooperam (PORTER, 2000). Kulldorff e Nagarwalla (1995) destacaram diversas formas de identificação de *clusters*, como as apresentadas nos estudos Marshall (1991) e Hills e Alexander (1989), e por fim apresentaram a estatística scan de Kulldorff como alternativa aos estudos espaciais.

1.3.6.1 Quociente Locacional

A Economia Regional utiliza das medidas de localização, entre elas o quociente locacional, para identificar os padrões de concentração ou dispersão espacial de atividades em um determinado período. As medidas de localização e especialização são métodos de análise regional utilizados na formulação de políticas de descentralização industrial e para o conhecimento dos padrões regionais do crescimento econômico (HADDAD, 1989). As medidas voltam-se a verificar o grau de especialização de regiões com relação a algum critério de referência (MONASTÉRIO, 2011).

Dentre as medidas de localização, o quociente de locacional (*QL*) é uma das estatísticas descritivas mais utilizadas na análise regional (CROMLEY; HANINK, 2012). De acordo Fotheringham (1997) o uso deste índice, na literatura, cresceu com o desenvolvimento dos sistemas de informação geográfica (SIG), sendo aplicado na análise de localização de atividades econômicas.

De forma geral, o índice *QL* apresenta limitação na identificação de causa e efeito das associações, apontando apenas o comportamento e não identificando as forças

econômicas que resultam no agrupamento. Todavia, trata-se de uma ferramenta importante para compreender o funcionamento de setores (LODDER, 1974).

1.3.6.2 Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE)

Como já apresentado, os estudos econômicos, mais especificamente a econometria convencional, não apresenta suporte para elucidar problemas espaciais. Para superação dessa impossibilidade a econometria espacial engloba os efeitos da autocorrelação espacial e da heterogeneidade espacial na análise de dados (ANSELIN, 1996).

O efeito da autocorrelação espacial é resultante da interação de uma variável observada entre regiões vizinhas, ou seja, ocorre como consequência de uma relação funcional entre o que ocorre na região, ou espaço i , e o que ocorre em outro local do espaço; tornando o comportamento da variável observada dependente não só de fatores internos a região estudada, mas também pelos fatores espaciais externos (ANSELIN, 1988; SILVA et al., 2011).

O conceito de autocorrelação espacial reflete a Lei de Tobler, conhecida como a Primeira Lei da Geografia, na qual encontra-se uma simples e completa definição sobre as relações espaciais, na qual se entende que tudo depende de todas as coisas ao seu redor, mas as coisas próximas estão mais relacionadas do que as coisas distantes (TOBLER, 1970). Por sua vez, o efeito da heterogeneidade espacial está associado a Segunda Lei da Geografia e é resultante do uso de dados de unidades espaciais muito distintas pra tentar explicar um fenômeno, o que resulta em instabilidade estrutural (GOODCHILD, 2004; SILVA et al., 2011).

Dessa forma, a análise exploratória de dados espaciais é um conjunto de técnicas utilizadas para descrição das distribuições espaciais de um fenômeno, voltadas a compreender a associação ou dependência espacial de uma atividade ou característica regional e/ou sua heterogeneidade espacial. Silva et al. (2011) indica que o maior uso das técnicas espaciais na literatura iniciou-se a partir dos trabalhos de Anselin (1992), com a disponibilidade de softwares para análises dos dados espaciais.

A utilização do método é fundada na capacidade de identificar localidades atípicas (*outliers*) e pontos de alavancagem, evidenciar padrões de associação espacial (*clusters*) e indicar instabilidades no espaço. A AEDE apresenta utilização em dados espaciais

poligonais ou na forma de pontos, podendo ser estudada, também, sob perspectiva geoestatística (ALMEIDA, 2012).

1.3.6.3 Estatística Scan

O modelo da estatística Scan foi um sucessor da análise de *cluster* apresentada por Naus (1965). Desenvolvida inicialmente para avaliação espacial de casos epidemiológicos, é utilizada para detectar áreas com elevada taxa de incidência de uma determinada atividade, a partir de uma razão de verossimilhança e utilizando uma varredura multidimensional. O modelo scan apresenta elevada aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento, como as análises de qualidade ambiental (PERCHINUNNO; MONGELLI; ROTONDO, 2020), de crimes e acidentes (DAI, 2012; O'LOUGHLIN; WITMER, 2011) e para o setor florestal (RANDOLPH, 2017; SHEKEDE, MUPANDIRA; GWITIRA, 2020).

A estatística realiza um conjunto de iterações sobre a área de estudo, seja a partir de janelas cilíndricas, para análises espaço temporal, ou circulares, para análises espaciais. Os resultados obtidos são validados a partir de testes de razão de verossimilhança para comprovação da significância dos *clusters* encontrados (VIEIRA; CANÇADO, 2013).

Segundo Balieiro (2008), do ponto de vista estatístico, o método scan de Kulldorff, apresenta como principal vantagem, a não especificação de dimensão e localização dos *clusters*, o que evita um viés de pré-seleção e que reduz o problema da unidade de área modificável. Por sua vez, a desvantagem em seu uso está nas janelas de varredura, que por serem circulares, implicam em possíveis subestimação ou superestimação de conglomerados.

A estatística scan pode ser realizada para varreduras discretas ou contínuas, sendo a primeira mais usual. Para as variáveis discretas, as localidades geográficas dos eventos estudados são previamente fixadas. A partir da seleção de variáveis podem ser selecionados diferentes modelos de probabilidade para aplicação do método como: o modelo discreto baseado em Poisson, em que o número de eventos são observados com base em uma população conhecida e sobre risco; o modelo de Bernoulli, com eventos de dados do tipo 0/1, tais como casos e controles; o modelo de permutação no espaço-temporal, utilizado quando apenas o número de eventos é conhecido (desconhecimento da população sob risco); o modelo multinomial para dados categóricos; o modelo ordinal para dados em ordem hierárquica; um modelo exponencial para casos sem variáveis censuradas;

um modelo normal, para outros tipos de dados contínuos; ou um modelo de variação espacial capaz de identificar tendências temporais de zonas de alta ou baixa aglomeração (KULLDORFF, 2015).

1.3.7 Economia industrial

Segundo Kon (2017) os estudos dedicados a Teoria da Economia Industrial apresentaram desenvolvimento na década de 1950. Todavia as análises precursoras estiveram associadas aos tópicos de microeconomia, sendo denominada de Economia da Indústria, Organização Industrial, Economia de Negócios, Indústria e Comércio e outros. A economia industrial apresenta uma relação aos conceitos da teoria microeconômica neoclássica e avalia como firmas e mercados estão organizados e as relações existentes entre eles. Para sua aplicação podem ser utilizadas informações de número de participantes, existência de barreiras à entrada de firmas, concentração de mercado e integração vertical (PALAURO, 2015).

Segundo Bain (1959), as estruturas de mercado são parte indispensável da organização industrial, tendo em vista que abarcam o desenvolvimento econômico setorial e definem condições de entrada de concorrentes. A análise econômica considerando as barreiras a novas entradas foi idealizada a partir dos estudos de Hall e Hitch (1939), onde considerou-se a Teoria do Custo Total. A entrada de participantes caracteriza-se pelo estabelecimento de novas firmas produtoras, excetuando a expansão da produção de empresas anteriormente participantes do mercado desta definição. Consequentemente, o conceito de barreira à entrada torna-se os obstáculos impostos às novas empresas ingressantes em determinados mercados. As principais barreiras são devidas à economia de escala, diferenciação de produtos, vantagens absolutas em custos, integração vertical de firmas existentes e restrições governamentais (BAIN, 1959).

As barreiras por economias de escala caracterizam a queda dos custos de produção de um bem com o aumento da planta industrial, implicando em dificuldades a implementação de firmas com plantas inferiores a escala eficiente mínima. Quanto a diferenciação de produtos, a barreira existe com relação à preferência de compradores por produtos específicos com relação aos demais ou a qualquer outro novo, implicando na obrigatoriedade de preços inferiores às novas empresas ou em gastos excessivos com publicidade (PALAURO, 2015).

Para as vantagens absolutas de custos, as barreiras associam-se aos custos médios enfrentados por novas empresas, quando observado um maior custo para os insumos e menor nível tecnológico nos entrantes. A integração vertical das empresas já instaladas, ou seja, o domínio de um ou mais processos posteriores relativos ao produto final, também dificultam a integração de novas empresas, assim, uma firma não integrada pode estabelecer contratos de longo prazo com as empresas com as quais realiza negócios. A decisão da firma em se integrar verticalmente e estabelecer contratos com restrições verticais é uma decisão estratégica, uma vez que isso afeta os preços e comportamentos da própria firma e de outras a ela relacionada. Um último fator são as restrições governamentais à entrada de novas firmas, que ocorre quando o Estado garante direitos exclusivos ou isenções fiscais superiores à empresas já instaladas (PERLOFF; CARLTON, 2005).

A partir de Labini (1980) e Possas (1999) notou-se a insuficiência da teoria neoclássica e então adotou-se o conhecimento das estruturas de mercado para maior dinamicidade do modelo da Teoria do Oligopólio. O conceito das estruturas de mercado é apresentado por Possas (1999), a partir de três perspectivas. A primeira engloba às características do mercado: o número de concorrentes e a existência de monopólio, oligopólio ou concorrência. A segunda análise leva em consideração à concentração e as barreiras de entradas a novos participantes, sendo incluso também, os custos e integração vertical entre as empresas. A última abordagem diz respeito à evolução da estrutura de mercado, com base no tipo de concorrência, no grau de concentração e o desenvolvimento tecnológico setorial.

Da necessidade de conhecer as estruturas de mercado, a análise da concentração pode ser observada como uma ferramenta importante, sendo capaz de relacionar número e participação de empresas.

1.3.7.1 Concentração industrial

A concentração industrial é uma das principais características da competição industrial; sugerindo que uma indústria concentrada, ou seja, controlada por um pequeno número de firmas, prejudica a competição. De acordo com Kon (2017) a concentração pode ser observada de maneira estática ou em seus aspectos dinâmicos, com base no seu crescimento ou decréscimo no tempo. A análise temporal da concentração pode inferir o

impacto do número de participantes na estrutura de mercado, a desigualdade no tamanho de firmas, a capacidade de inovação e a intensidade das barreiras de entrada.

As medidas de concentração são ferramentas importantes para determinação de estruturas de mercado, sendo capazes de avaliar o domínio de uma empresa ou o conjunto delas sobre as atividades econômicas de uma região. A partir deste ponto, as medidas são indispensáveis para avaliar as participações dos agentes, com base em parcelas de participação (*market share*) (RESENDE, 1994; LIU; MIRZAEI; VANDOROS, 2014).

A análise da concentração leva em consideração a quantidade e o potencial produtivo das empresas e de fornecer resultados para observação de políticas públicas (*antitrust*), avaliação de fusões e avaliação do poder de mercado dos participantes (GEORGE; JOLL, 1983; VARUM et al., 2016). O poder de mercado, está associado a representatividade de uma empresa (ou um grupo econômico) sobre o setor, ou seja, a capacidade de aumentar o preço de um bem mantendo-se sob um nível competitivo (LANDES; POSNER, 1981). Dentre os índices mais usuais estão: a curva de concentração, razão de concentração, índice de Herfindahl-Hirschman e o índice de Hoover, todos com uso recorrente na literatura (VARUM et al., 2016).

1.3.8 Polarização e desigualdade

A análise da polarização é uma ferramenta capaz de auxiliar aos tradicionais índices de desigualdade, como o Gini e Theil. Segundo Jenkins (1995) e Burtless (1997), estes indicadores não possibilitam a visualização de agrupamentos dentro de grupos específicos, seja no centro ou extremos da distribuição. Embora a polarização e desigualdade estejam associados à concentração, a qual não pode ser compreendida como uma medida idêntica (HOFFMAN, 2008).

De acordo com Fantinel (2017), as medidas de polarização apresentam especificações que dependem da quantidade de grupos participantes. A primeira delas diz respeito ao fato que, quanto maior o número de grupos menor será a polarização. A segunda especificação mostra que quanto maior for a dispersão dentro de um mesmo grupo, menor será a polarização total e a última de que quanto maior a distância entre os grupos, maior será a polarização.

Os estudos de polarização de renda são regidos a partir de duas abordagens principais. A primeira de Wolfson (1994) descreve a polarização com ocorrência entre apenas dois grupos (bipolarização), a segunda de Esteban e Ray (1994) estabelece que a

polarização pode ocorrer entre diversos grupos e ser mensurada para diversas variáveis, além da renda (BRZEZINSKI, 2017).

O índice de bipolarização foi iniciado nos estudos de Wolfson (1994) e tem como princípio básico a divisão da população em apenas dois grupos, sendo um maior distanciamento entre estes, resultado de uma elevada polarização. Para a construção do índice de polarização, Foster e Wolfson (2010) optaram por uma medida baseada em uma curva de polarização que atua de forma semelhante ao coeficiente de Gini e a curva de Lorenz (FANTINEL, 2017).

Dois movimentos podem conduzir ao aumento da polarização. O primeiro deles é resultante do afastamento de grupos do centro da distribuição (aumento na dispersão), o que é resultado do aumento da variável de estudo para categoria com mais recurso ou diminuição desta para categoria com menos recurso. O segundo é decorrente do aumento da bipolaridade, ou seja, o centro de massa não muda (FANTINEL, 2017).

Por sua vez, o conceito de polarização em grupos foi estabelecido nos trabalhos de Esteban e Ray (1994). Trata-se de uma noção mais geral de polarização, na qual busca-se entender a separação ou aproximação entre grupos, considerando o grau de identidade entre participantes de um mesmo grupo e o grau de alienação em relação a outros (HOFFMAN, 2008). A medida foi discutida também nos estudos de Duclos, Esteban e Ray (2004) e Esteban, Gradín e Ray (2007).

De acordo com Esteban, Gradín e Ray (2007), a análise da polarização de múltiplos grupos é apropriada para grupos com formação pré-definida, seguindo características qualitativas, e não sendo estabelecido critério de separação quantitativo. Ainda segundo os autores, é indispensável que para o cálculo da polarização, a população de estudo esteja previamente definida em agrupamentos, com o objetivo de que se mensure a estrutura de identificação dos grupos.

A alienação entre os grupos, está associada a distância entre os participantes. Para o exemplo de renda, torna-se mais alienado, grupos com grandes distâncias de rendimentos. Por sua vez, a identificação apresenta sentido inverso, sendo manifestada em grupos bem definidos (HOFFMANN; NEY, 2009).

2 ARTIGO 1 – EVIDÊNCIAS DA BIONERGIA PARA A BIOELETRICIDADE FLORESTAL: UMA REVISÃO SOB ANÁLISE ESPACIAL (1980 -2019)

RESUMO

A biomassa florestal é um recurso importante tanto no suprimento energético mundial quanto na mitigação das emissões de gases do efeito estufa. Em busca de reunir ensaios de geração de eletricidade florestal associados à estudos espaciais, a fim de compreender e identificar as lacunas existentes. Assim, este artigo analisou as evidências da análise espacial na bioeletricidade florestal, no período de 1980 a 2019. Levantou-se os artigos científicos e de revisão da temática publicados em periódicos e disponíveis nas plataformas da *ISI Web of Knowledge* e *Scopus* e foi realizada uma análise bibliométrica e revisão sistemática de literatura. Os resultados mostraram que no período estudado houve 28 publicações das análises espaciais da bioeletricidade florestal, distribuídos em artigos científicos (92,85%) e em artigos de revisão (7,14%). O primeiro ensaio foi em 1989, tratando do uso energético biomassa florestal na Zâmbia; todavia observou-se aumento significativo das publicações durante a década de 2010, sendo os Estados Unidos o país com maior contribuição (11 trabalhos). Da análise de conteúdo destacaram três áreas principais (ambientais, econômico financeira e disponibilidade). As análises ambientais associadas ao espaço evidenciaram eficiência do uso da biomassa florestal para diminuição das emissões de GEE, além de ser alternativa viável para cumprimento de políticas energéticas para os países desenvolvidos. As análises econômico-financeiras apontaram que embora o uso da biomassa florestal para geração de eletricidade tenha retorno econômico positivo, os custos de transporte apresentam-se como principal barreira ao crescimento. Associada diretamente à viabilidade econômica, a avaliação de potencial e disponibilidade, também inferiu sobre a importância do espaço na bioeletricidade florestal, apontou a correlação entre a localização dos geradores de energia e áreas com maior desenvolvimento de florestas. Os resultados forneceram uma visão sobre a evolução das pesquisas, indicando lacunas para novos estudos, com ênfase, nas análises do padrão e distribuição espacial de termelétricas instaladas. Observou que as análises espaciais podem contribuir como ferramenta de apoio para tomadores de decisão, fornecendo orientação explícita sobre custos, eficiência e localizações ideais para o uso da bioeletricidade florestal.

Palavras-chave: Energia Renovável, Bioenergia, Biomassa florestal, Biblioemtria.

**ARTICLE 1 - EVIDENCES OF BIOENERGY FOR FOREST BIOELECTRICITY:
A REVIEW ON THE SPACE ECONOMY (1980-2019)**

ABSTRACT

Forest biomass is an important resource both in the global energy supply and in the mitigation of greenhouse gas emissions. In search of gathering forest electricity generation tests associated with space studies, in order to understand and identify the existing gaps. Thus, this article analyzed the evidence of spatial analysis in forest bioelectricity, in the period from 1980 to 2019. The scientific articles and thematic review published in journals and available on the platforms of ISI Web of Knowledge and Scopus were surveyed and a survey was carried out bibliometric analysis and systematic literature review. The results showed that in the studied period there were 28 publications of spatial analyzes of forest bioelectricity, distributed in scientific articles (92.85%) and in review articles (7.14%). The first trial was in 1989, dealing with the energy use of forest biomass in Zambia; however, there was a significant increase in publications during the decade of 2010, with the United States being the country with the largest contribution (11 papers). From the content analysis, three main areas were highlighted (environmental, economic, financial and availability). The environmental analyzes associated with the space showed efficiency in the use of forest biomass to reduce GHG emissions, in addition to being a viable alternative for complying with energy policies for developed countries. The economic-financial analyzes showed that although the use of forest biomass for electricity generation has a positive economic return, transportation costs are the main barrier to growth. Associated directly with economic viability, the assessment of potential and availability, also inferred about the importance of space in forest bioelectricity, pointed out the correlation between the location of energy generators and areas with greater forest development. The results provided an insight into the evolution of research, indicating gaps for further studies, with an emphasis on the analysis of the pattern and spatial distribution of installed thermoelectric plants. The results showed that spatial analysis can contribute as a support tool for decision makers, providing explicit guidance on costs, efficiency and ideal locations for the use of forest bioelectricity.

Keywords: Renewable Energy, Bioenergy, Forest biomass, Biblioemetry.

2.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um dos principais desafios do desenvolvimento econômico está associado à elevada demanda energética, com segurança e sustentabilidade. Além das soluções de eficiência energética, a inserção das fontes renováveis auxilia na garantia desta necessidade global. A bioenergia vem como uma alternativa estratégica complementar no suprimento energético e colaborando no combate às emissões de gases do efeito estufa (GEE). A geração de eletricidade a partir da biomassa promove agregação de valor no setor florestal, proporcionando emprego e renda (AKHTARI; SOWLATI; DAY, 2014; SÁNCHEZ-GARCÍA et al., 2015). Em 2018, o suprimento mundial energético foi 14.2795,69 milhões de tonelada equivalentes de petróleo (tep), onde 13,84% oriundos das energias renováveis, com 1,33 milhões tep (9,30%) da biomassa. A geração de eletricidade foi 26.730,06 Tera Watts hora (TWh) a biomassa apresentou 637,23 TWh (2,38% da geração mundial) com crescimento de 7,14% a.a. (2010 a 2018). Os principais produtos da biomassa para fins energéticos (agroindustriais e florestais) são destinados diretamente, para o aquecimento ou eletricidade e, indiretamente, na cogeração de energia nos processos industriais (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2020; SUN et al., 2013).

A biomassa florestal para fins energéticos pode ser obtida dos resíduos das atividades madeireiras e arborização urbana. Apresenta vantagens como fácil armazenamento, multiplicidade de conversões (sólido, líquido e gás) e renovabilidade, promovendo o desenvolvimento local na geração de emprego e renda (DEMIRBAŞ, 2001; HALL; SCRASE, 1998; OPENSHAW, 2010; SOLOMON, B.; LUZADIS, 2009). Os estudos da biomassa florestal vão além do desenvolvimento das tecnologias de transformação, uma vez que tem efeitos no planejamento energético. Apesar de diversos campos de pesquisa serem observados, várias lacunas, associadas à bioeletricidade florestal ainda persistem. A literatura apresenta estudos voltados às tecnologias da biomassa para geração de calor (DEMIRBAS; BALAT; BALAT, 2009; HU et al., 2018; TILLMAN, 2000) e de eletricidade (BRIDGWATER, 2003; GONZÁLEZ et al., 2015; UPRETI; VAN DER HORST, 2004). Há outras áreas como os estudos econômicos (BRIDGWATER; TOFT; BRAMMER, 2002; CARDOSO; SILVA; EUSÉBIO, 2019; SADHUKHAN et al., 2018) e ambientais (LEWTAS, 2007; RANDERSON et al., 2012).

Embora em menor proporção, as análises espaciais estão associadas, principalmente, à disponibilidade e à qualidade da biomassa, também, são abordagens

relevantes, contribuindo na compreensão do potencial de utilização em vários setores (KUMAR et al., 2015). A existências de lacunas sugerem que a literatura da bioeletricidade florestal pode ser aperfeiçoada. Dane (1990) afirmou que a revisão bibliográfica é uma ferramenta indispensável para avaliação dos limites e lacunas atuais de uma determinada área de estudo. Para tanto, é necessário o conhecimento de palavras-chave, autores e periódicos, associados à pesquisa. Para Linde e Willich (2003) uma revisão sistemática da literatura disponibiliza um conjunto de evidências relacionadas a um processo específico, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada. A análise bibliométrica, assim como uma revisão sistemática, fornece informações do crescimento da literatura e do fluxo de conhecimento ao longo de um período (DE BELLIS, 2009; VAN RAAN, 2005).

A revisão sistemática literatura e a análise bibliométrica mapeiam e identificam as possíveis vacâncias na pesquisa de uma determinada temática, além de destacar as fronteiras do conhecimento em que estão associadas (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Saberi, Sahebi e Zerehsaz (2020) afirmaram que as revisões da literatura devem ser realizadas através de um ciclo iterativo de palavras-chave apropriadas, pesquisa da literatura e avaliação dos temas estudados. Para a bioenergia florestal os artigos de revisão estiveram voltados a duas temáticas principais: processos tecnológicos para combustíveis energéticos (MAZAHERI et al., 2019; MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006; PRADHAN; ARORA; MAHAJANI, 2018) e a ecologia e ciências ambientais (BALDOCCHI, 2003; INGRAO et al., 2018; PAREDES-SÁNCHEZ et al., 2019; RANIUS et al., 2018), sendo as análises espaciais para bioeletricidade, negligenciados. Em busca de identificar o impacto, o desenvolvimento de pesquisas e as lacunas existentes associadas à bioeletricidade florestal. Para tal, realizou uma análise bibliométrica e revisão sistemática aplicadas à bioeletricidade florestal mundial sob o olhar das análises espaciais, com base nos dados da plataforma Web of Science e Scopus, entre os anos de 1989 e 2019.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Bibliometria e Revisão sistemática

Os processos metodológicos da revisão sistemática seguiram Tranfield; Denyer; Smart (2003), conforme Figura 2.1.

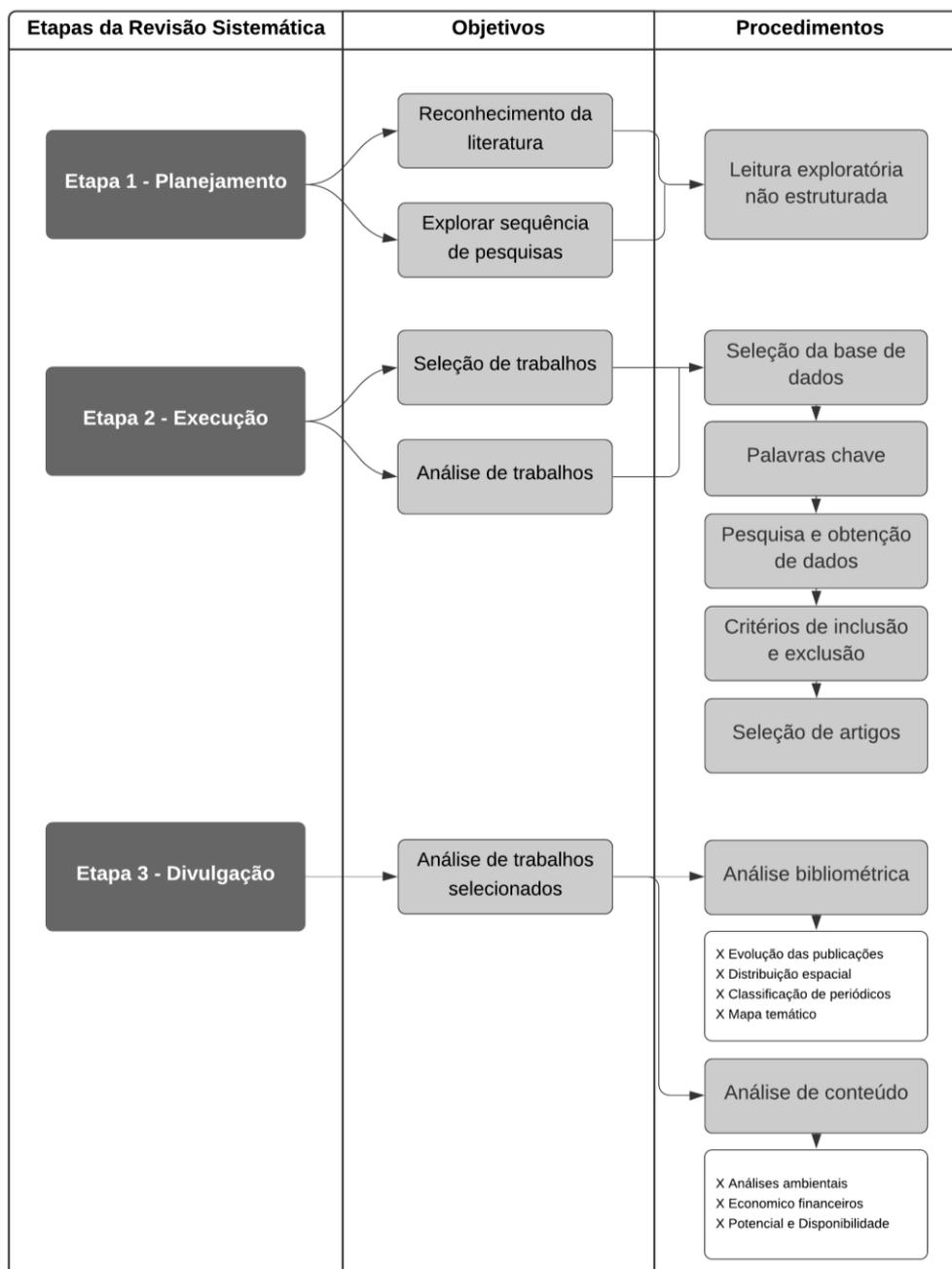


Figura 2.1. Resumo descritivo das etapas de revisão sistemática.

Fonte: Adaptado de Tranfield, Denyer; Smart, 2003.

Etapa 1. Planejamento da revisão sistemática

Para reconhecimento das principais abordagens e palavras-chave associadas realizou-se, inicialmente, uma leitura exploratória não estruturada. Observou na literatura os termos recorrentes para a biomassa florestal e foram executadas pesquisas em sequência, para avaliar sua aplicabilidade.

Etapa 2. Execução da revisão sistemática

Essa etapa contemplou a definição da amostra de artigos. Para as fontes de busca, Webster e Watson (2002) destacaram que é altamente provável que nas revistas de maior fator de impacto encontrem-se os trabalhos de maior relevância para qualquer área de estudo. O levantamento de publicações em periódicos relacionados às análises espaciais da bioeletricidade florestal foi realizado por consulta as bases ISI Web of Knowledge (Web of Science - WoS) e Scopus, em abril de 2020. Wang e Waltman (2016) destacam estes como os bancos de dados bibliográficos mais importantes e prestigiados do mundo.

As palavras-chave e o sequenciamento de refino utilizados são apresentadas na Figura 2.2. A busca foi realizada por “Tópicos”, que englobou títulos, resumos e palavras-chave (autor e adicionais). A pesquisa utilizou as palavras-chave: (i) Forest biomass + electricity + spatial analysis; (ii) Forestry biomass + electricity + spatial analysis; (iii) Wood biomass + electricity + spatial analysis; (iv) Forest waste + electricity + spatial analysis; (v) Charcoal + electricity + spatial analysis; (vi) Firewood + electricity + spatial analysis; (vii) Black Liquor biomass + electricity + spatial analysis (viii) Biomass blast furnace gas + electricity + spatial analysis. Para identificar a amostra de artigos, entre cada conjunto de palavras-chave utilizou-se a lógica Booleana “OR”. O grande número de palavras-chave foi utilizado para favorecer a identificação de estudos mais estritos.

Foram considerados os seguintes critérios de exclusão: (i) Tipo de documento, foram admitidos apenas artigos e artigos de revisão; (ii) Temporal, foram excluídas pesquisas apresentadas em 2020, assim tomou o período de 1989 a 2019.; (iii) Categoria (não houve exclusão para este critério); (iv) Duplicatas, foram removidos trabalhos que apresentaram duplicidade entre as bases utilizadas (WoS e Scopus); (v) Leitura de abstracts e (vi) Leitura integral de artigos; a partir dos critérios de leitura foram excluídas as pesquisas com análises estritamente químicas, estudos da biomassa florestal não destinados a eletricidade e avaliações que utilizaram, exclusivamente, biomassa não florestal.

Para Tranfield, Denyer e Smart (2003) apenas os trabalhos que atenderam aos critérios de inclusão devem ser mantidos na amostra, sendo importante documentar o número de pesquisas excluídas em cada critério de exclusão. Após as etapas de exclusão, a amostra final desta pesquisa foi de 28 artigos científicos. De posse da amostra final de trabalhos, foi realizada tabulação e conexão manual dos dados das plataformas WoS e Scopus, em MS Excel. Foram considerados os parâmetros: título, autores, tipo do

documento, ano de publicação, país, instituições participantes, área temática, palavras-chave, número de citações e periódicos.

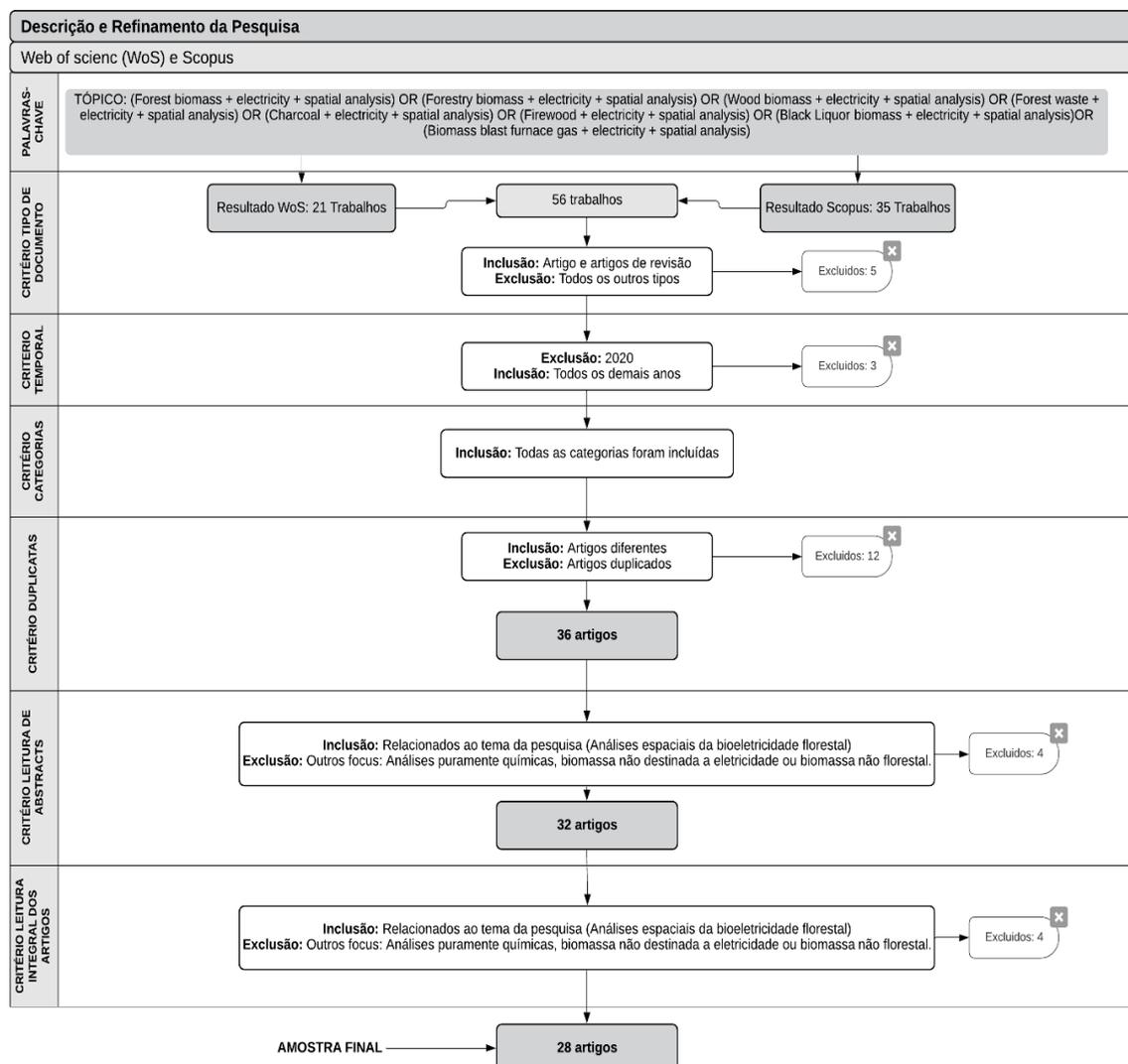


Figura 2.2. Etapas da pesquisa para análises espaciais da bioeletricidade florestal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Etapa 3. Divulgação da revisão sistemática

White e Marsh (2006) destacaram que a revisão de literatura pode ser observada por abordagens quantitativas, qualitativas, ou ambas, como nesta pesquisa. Os resultados foram apresentados a partir de análise bibliométrica e de análise de conteúdo. Para a bibliometria foram realizadas análises da evolução das publicações, distribuição espacial das pesquisas, classificação de periódicos e mapa temático de palavras-chave.

A evolução do número de publicações de 1989 a 2019 foi analisada considerando a quantidade anual e acumulada, por artigo e artigos de revisão. Para a distribuição espacial foram construídos os quartis da publicações por países, categorizados em: Q1 ($0 < Q1 \leq 25\%$), correspondente a quarta parte, Q2 ($25\% < Q2 \leq 50\%$), valor que coincide com a mediana, pela terceira quarta parte o Q3 ($50\% < Q3 \leq 75\%$) e pela quarta parte final o Q4 ($75\% < Q4 \leq 100\%$) (DAWSON, 2011). Os mapas foram elaborados com o *software* QGIS 3.10.1. Observou a classificação de periódicos, com a descrição dos fatores de impacto (JCR - *Journal Citation Reports* e SJR - *Scientific Journal Rankings*) e número de citações para cada revista. Com as redes de palavras-chave associada às análises espaciais da bioeletricidade florestal montou-se os *clusters* temáticos, por meio do *software* VOSViewer 1.6.11, observando as maiores ocorrências.

Na última etapa foi realizada a análise de conteúdo, a qual ocorreu de forma flexível, a fim de identificar as áreas de maior impacto para os estudos espaciais da bioeletricidade florestal. Ao final da leitura integral dos artigos foi realizada uma categorização da amostra final, com base no conteúdo exposto. Bezerra; Gohr e Morioka (2020) ressaltaram que é necessário uma boa interpretação dos pesquisadores no processo de categorização, tendo em vista que diferentes trabalhos podem não ter o mesmo significado, porém, complementam a temática observada. Os estudos de análises espaciais da bioeletricidade florestal foram classificados de acordo com a Tabela 2.1. O diagrama de Venn foi utilizado com a participação dos artigos em cada categoria. Na avaliação de conteúdo, buscou-se realizar uma descrição dos objetivos e das principais conclusões dos estudos, observando o impacto na área de classificação e sua contribuição sob o ponto de vista espacial.

Tabela 2.1. Classificação das análises espaciais da bioeletricidade florestal.

Classificação	Definição
Análises ambientais (AA)	Estudos relacionados aos impactos ambientais: desmatamento florestal, erosão e emissões de gases do efeito estufa (GEE).
Estudos econômico financeiros (EF)	Avaliação de investimentos e/ou custos para bioeletricidade florestal, seleção de porte e localizações ótimas para instalação de termelétricas.
Potencial e/ou disponibilidade (PD)	Avaliação de cobertura vegetal disponível para utilização na bioeletricidade florestal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2.3 apresenta a evolução das publicações de análises espaciais para a bioeletricidade florestal, de 1989 a 2019. Contabilizou-se 28 artigos após o processo de refinamento da pesquisa, sendo 26 artigos (92,86%) e 2 revisões (7,14%). Para a década de 1980, registrou apenas o trabalho de Chidumayo (1989), com 12 citações, abordou a evolução do desmatamento nas florestas da Zâmbia. O autor atribuiu grande parte da retirada da madeira ao uso irrestrito para geração de calor de processo e eletricidade por parte das indústrias de mineração. O segundo estudo foi identificado apenas na década de 2000, Bryan, Ward e Hobbs (2008) apresentaram um estudo econômico com base em análises espaciais com GIS, com 43 citações.

A década de 2010 apresentou a maior concentração de publicações, com 26 artigos. O crescimento de novos trabalhos foi em razão da importância do uso sustentável da madeira, das políticas de incentivos ao uso de energias renováveis, da diversificação da matriz energética e pela busca por eficiência energética, principalmente nos países da União Europeia e Estados Unidos. Os trabalhos mais citados para este período foram Cambero et al. (2015) (56 citações), Schmidt et al. (2010) (43 citações) e Steubing et al. (2014) (42 citações). O ano com maior número de publicações foi 2018, com 6 artigos.

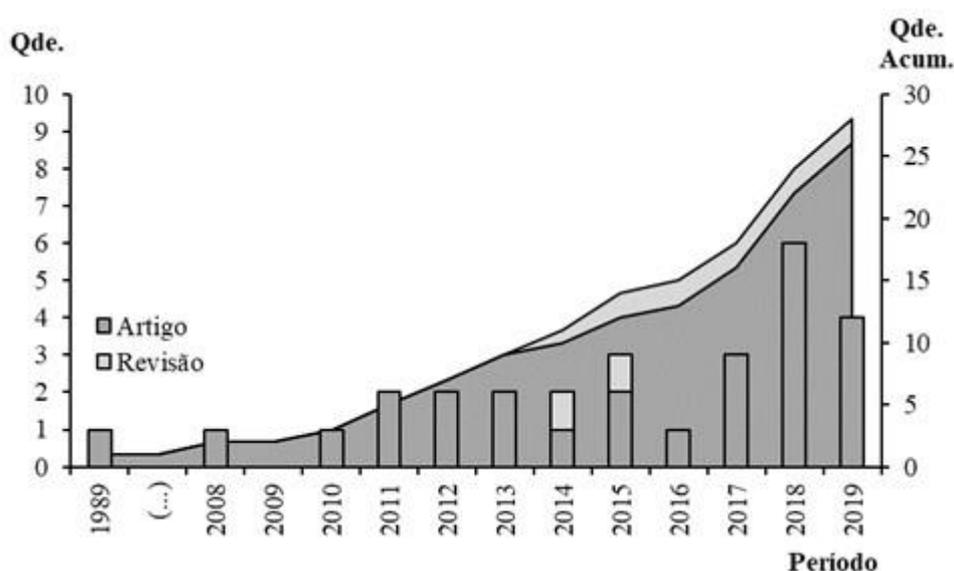


Figura 2.3. Evolução das publicações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*, de 1989 a 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A distribuição espacial das publicações para análises espaciais da bioeletricidade florestal foi apresentada em quartis (Figura 2.4). Ao todo, 20 países participaram das publicações das análises espaciais. No quartil 1, com 3 publicações, estiveram a Áustria, Canadá e Suécia, os principais centros de pesquisa associados a estes foram a Universidade Técnica da Lulea – Suécia (2 publicações), a Universidade da Colúmbia Britânica– Canadá (2 publicações) e o Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados associado a Universidade de Recursos Naturais e Ciências da Vida da Áustria (2 publicações). Com 2 publicações estiveram a China, Alemanha, Itália, Países Baixos e a Suíça. Destacaram a Universidade de Wageningen (2 publicações) e a Academia Chinesa de Ciências (2 publicações). Também registrou 11 países com apenas 1 publicação, foram: Argentina, Austrália, Brasil, Dinamarca, Índia, Israel, Japão, México, Noruega, Espanha e Zâmbia. Não houve participantes para o quartil 2 e 3.

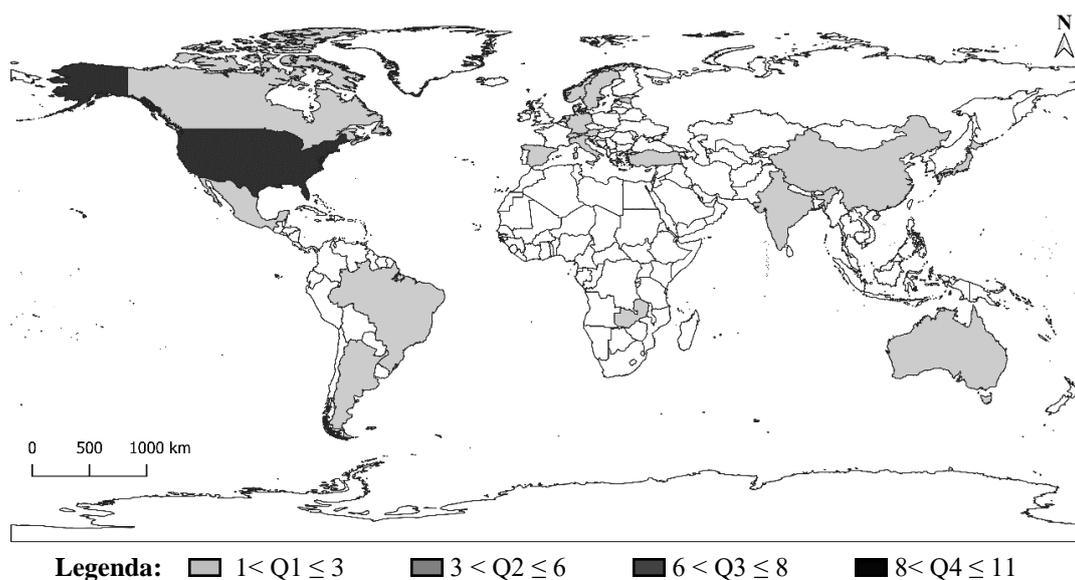


Figura 2.4. Distribuição espacial, por países, em quartis, da quantidade de publicações científicas, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*, de 1989 a 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os Estados Unidos (11 artigos) foram o único participante para o quartil 4. A Universidade do Missouri foi a instituição de maior impacto na pesquisa (3 artigos), dentre os principais financiadores estiveram a USDA (2 publicações) e o Instituto Nacional de Alimentos e Agricultura americano (NIFA) (2 publicações). O destaque norte americano

pode ter ocorrência com o elevado consumo de carvão mineral no país e as vigentes políticas energéticas que buscam a renovabilidade e descarbonização da matriz energética nacional, de modo que, 7 trabalhos foram desenvolvidos como estudo de caso. Todos os trabalhos registrados foram escritos em língua inglesa, apenas Aruga et al. (2011) também apresentaram uma versão em croata.

A Tabela 2.2 apresenta os periódicos de publicação científica e indicadores de fator de impacto e citações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas Web of Science e Scopus, de 1989 a 2019. A revista *Biomass and Bioenergy*, contou com 4 artigos e apresentou JCR 3,551 (1.068 citações) e SJR de 1,110 (3.847 citações), para o ano de 2018. O periódico esteve classificado no principal quartil (Q1) da área de estudos florestais (SJR). Os artigos publicados nesta revista foram Stasko et al. (2011), Goerndt, Aguilar e Skog (2013), Lundmark, Athanassiadis e Wetterlund (2015) e Jin e Sutherland (2018).

A *Global Change Biology (GCB) Bioenergy* apresentou três artigos nesta área: Verón et al. (2012), Oliver e Khanna (2017) e Kalt et al. (2018), teve JCR de 5,316, com 364 citações e SJR de 1,810, com 1.613 citações, alcançando o quartil um (Q1) para área florestal e de energia renovável. Com dois artigos, a *Applied Energy* apresentou o segundo maior valor de JCR (8,848), com 29.226 citações e com o maior SJR (3,607) da série, 53.715 citações e pertenceu ao quartil principal na área de energia; os artigos publicados nesse periódico foram: Sun et al. (2013) e Sánchez-García et al. (2015). Em seguida esteve a *International Journal Of Energy Research*, também com duas publicações, com JCR de 3,741 (2.276 citações), SJR de 0,785 (2.824 citações) e ocupou o Q2 para estudos da energia renovável, os trabalhos foram: Schmidt et al. (2010) e Cambero et al. (2015). A *Sustainability (Switzerland)* apresentou os artigos de Viccaro et al. (2017) e Hernández, Jaeger e Samperio, (2018) e contou com: JCR = 2,576 e SJR = 0,581.

Entre as revistas com apenas um artigo publicado, a *Renewable & Sustainable Energy Review* apresentou o maior JCR (12,110), com classificação no primeiro quartil da área de energias renováveis (Q1), o artigo apresentado foi a revisão sistemática de Akhtari, Sowlati e Day (2014). A *Forest Science* foi a revista com menor fator de impacto (JCR =1,693 e SJR =0,556), o periódico apresentou-se no quartil 2 (SJR) dos estudos em silvicultura e em ecologia, registrou o estudo de Pokharel et al. (2019).

A Figura 2.5 apresenta os clusters temáticos das análises espaciais da bioeletricidade florestal, no período de 1976 a 2019. Embora alguns estudos tenham

relação com múltiplas áreas, três grupos principais foram identificados: avaliação do uso da biomassa florestal para cumprimento de políticas de energia e ambiente, otimização da utilização de recursos de bioenergia e análises de custo. A análise das palavras-chave destacou a biomassa (21 ocorrências) como foco das pesquisas e apontou a principal origem do recurso como sendo a silvicultura (12 ocorrências), aumentando a relevância ambiental das análises. Outro conjunto de relevância foram os custos (10 ocorrências) da produção de madeira para eletricidade e os métodos de exploração do espaço que utilizou dos sistemas de informações geográficas – GIS (10 ocorrências).

Tabela 2.2. Periódicos de publicação científica e indicadores de fator de impacto e citações, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas *Web of Science* e *Scopus*, de 1989 a 2019.

Periódicos	Qde	JCR		SJR	
		Índice	Citações	Índice	Citações
Biomass and Bioenergy	4	3,551	1.068	1,110	3.847
GCB Bioenergy	3	5,316	364	1,810	1.613
Applied Energy	2	8,848	29.226	3,607	53.715
International Journal of Energy Research	2	3,741	2.276	0,785	2.824
Sustainability (Switzerland)	2	2,576	10.134	0,581	26.822
Biofuels, Bioproducts and Biorefining	1	4,528	248	1,140	975
Carbon Balance and Management	1	4,067	22	1,475	277
Croatian Journal of Forest Engineering	1	2,500	41	0,733	183
Energy	1	6,082	11.823	2,166	39.993
Energy Science and Engineering	1	2,631	790	0,716	394
Energy Strategy Reviews	1	3,895	399	1,336	694
Forest Science	1	1,693	64	0,556	305
Journal of Cleaner Production	1	7,246	25.176	1,886	72.709
Journal of Forestry	1	2,342	59	0,800	392
Land Degradation & Development	1	3,775	478	1,331	3.440
Land Use Policy	1	3,682	1.666	1,479	6.848
Renewable and Sustainable Energy Reviews	1	12,110	5.629	3,632	58.856
Renewable Energy	1	6,274	9.377	2,052	24.010
Science of the Total Environment	1	6,551	36.482	1,661	66.632
Waste Management	1	5,448	2.494	1,634	11.322

*Nota: Ano base de indicadores: 2019.

Legenda: Qde = quantidade de artigo; JCR = Journal Citation Reports e SJR = Scientific Journal Rankings

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

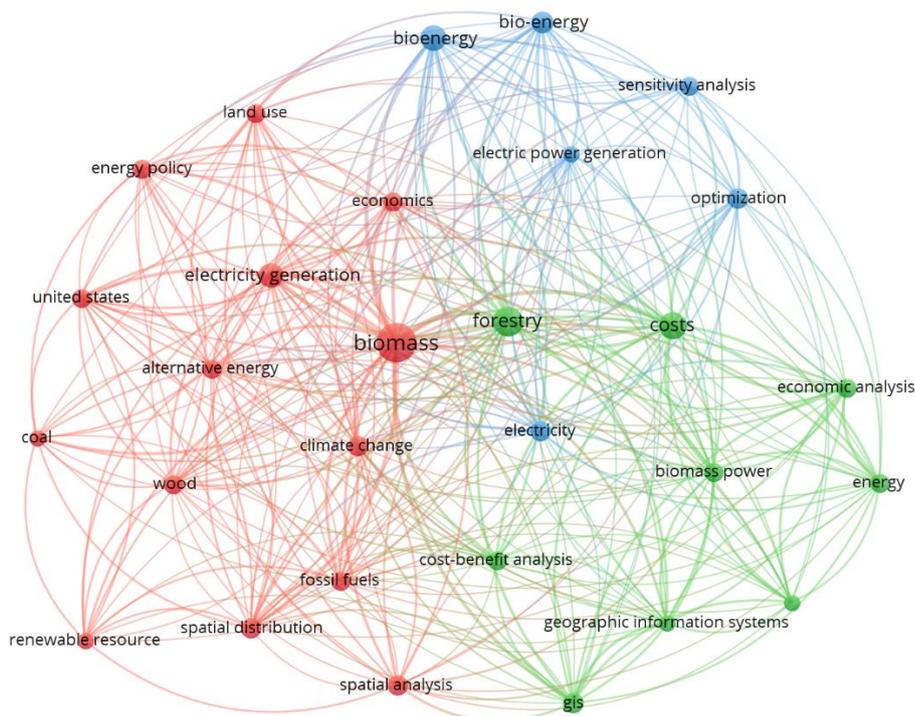


Figura 2.5. Visualização de clusters temáticos, para análises espaciais da bioeletricidade florestal, das plataformas *Web of Science* e *Scopus*, de 1989 a 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 2.6 apresenta o diagrama de Venn da classificação para análise espacial da bioeletricidade florestal. As análises do potencial e disponibilidade da biomassa representaram 25,00% dos artigos selecionados, seguido das análises ambientais (17,86%) e estudos econômico-financeiros (10,71%). Diversos trabalhos apresentaram mais de uma classificação: 28,57% para EF e PD, 3,57% para AA e EF e 14,29% para todas as categorias. A Tabela 2.3 complementa as informações do diagrama, ao apresentar as referências e número de citações para as áreas de análise de conteúdo.

▪ **Análises Ambientais (AA)**

Foram observados nove trabalhos que retrataram as análises ambientais. Para esta finalidade, o trabalho precursor foi o de Chidumayo (1989), que embora não estabelecesse avaliações de emissões dos GEE, retratou a evolução do desmatamento de florestas nativas no cinturão de cobre a Zâmbia. O autor apontou que a exploração das florestas para produção de lenha e carvão vegetal, destinadas à geração de calor e eletricidade nas usinas siderúrgicas, foi a causa inicial (1931 a 1962) para a retirada de cobertura vegetal na

região, porém com o avanço tecnológico no setor e o uso da hidroeletricidade, a demanda residencial passou a ser o principal passivo ambiental.

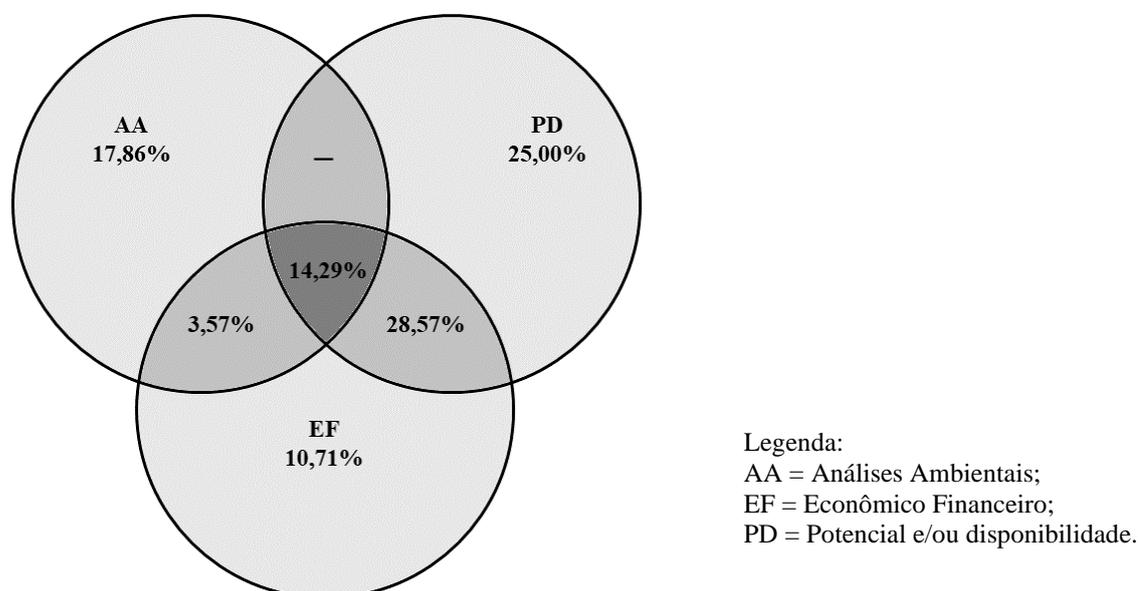


Figura 2.6. Diagrama de Venn da classificação para análise espacial da bioeletricidade florestal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O estudo trouxe contribuições importantes para análise espacial, utilizando-se de fotografias aéreas para análise de florestas e categorização da área de estudo. Os resultados foram complementados por dados da literatura e consultas feitas em instituições relevantes para determinar as mudanças na cobertura vegetal durante o período de 1937-1984.

Com o avanço tecnológico, as análises ambientais da década de 2000 e 2010 apresentaram avaliações da diminuição de emissões de GEE associadas as práticas de manejo florestal e destinação à bioeletricidade. O uso dos resíduos florestais com finalidade elétrica apresentou-se como viável ambientalmente (Smyth et al., 2018). Todavia, essa utilização ainda é negligenciada em diversas partes do mundo (Kalt et al., 2019) ou altamente dependente do incentivo à descarbonização da matriz elétrica, como em alguns países europeus (Mesfun et al., 2018). Bryan, Ward e Hobbs (2008) (AA+EF) destacaram ainda que, na Austrália, a produção de biomassa para geração de eletricidade tem o potencial de reduzir a salinidade de rios e erosão eólica, contribuindo para os objetivos ambientais regionais, cujo efeito pode ser extrapolado para diferentes partes do mundo.

Tabela 2.3. Referências e citações dos artigos da análise espacial da bioeletricidade florestal, por áreas de análise de conteúdo, de 1989 a 2019.

Classificação	Referências	Citações
AA	Chidumayo (1989), Smyth et al. (2018), Mesfun et al. (2018), Wang e Luo (2018) e Kalt et al. (2019).	38
EF	Stasko et al. (2011), Jiang, Searle e Siddiqui (2017), Raviv et al. (2018).	24
PD	Goerndt et al. (2012), Verón et al. (2012), Sánchez-García et al. (2015), Oliver e Khanna (2017); Pokharel et al. (2019), Romero et al. (2019), Ruiz et al. (2019).	66
AA+EF	Bryan, Ward e Hobbs (2008).	43
AA+PD	-	-
EF+PD	Schmidt et al. (2010), Sun et al. (2013), Goerndt, Aguilar e Skog, (2013), Akhtari, Sowlati e Day (2014), Cambero et al. (2015), Lundmark, Athanassiadis e Wetterlund (2015), Liu, Johnson e Altman (2016), Viccaro et al. (2017), Hernández, Jaeger e Samperio, (2018).	166
AA+EF+PD	Aruga et al. (2011), Steubing et al. (2014), Jin e Sutherland (2018).	114

Legenda: AA = Análises Ambientais; EF = Econômico Financeiro; PD = Potencial e/ou disponibilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Em uma análise mais específica, Wang e Luo (2018) investigaram as relações espaciais entre a expectativa de vida de recém-nascidos e a utilização de energia da biomassa na China. Embora não contabilizassem as emissões, os autores foram capazes de identificar que o uso residencial da biomassa florestal para aquecimento causou mais impactos à saúde do que as centrais termelétricas de geração de calor e eletricidade. Os autores indicaram também que sistemas com maior potência (MW) tendem a ter menor impacto ambiental.

Dentre as múltiplas áreas, alguns trabalhos apresentaram integração com as análises ambientais (AA+EF+PD), Aruga et al. (2011) destacaram que o uso da bioeletricidade florestal em pequenos sistemas de combustão direta ou de gaseificação apresentam redução significativa nas emissões comparadas aos combustíveis fósseis. Steubing et al. (2014) também apontaram que plantas de até 140 MW apresentam redução significativa nas

emissões de CO₂ e CHF, sendo a conversão, o processo de maior emissão de poluentes, seguido do custo de transporte de insumos e de colheita. Por sua vez, Jin e Sutherland (2018) indicaram a importância da co-queima da biomassa florestal com carvão mineral em termelétricas e destacaram a utilização de florestas energéticas como positivas para sequestro de carbono no solo. Segundo os autores, a remoção de resíduos de exploração para uso de energia pode evitar as emissões de metano dos processos de decomposição da matéria orgânica.

- **Econômico Financeiro (EF)**

Das análises econômicas foram identificados 16 artigos. A análise econômico-financeira aponta a importância da espacialização de usinas termelétricas sobre a viabilidade de projetos, associado aos elevados gastos com transporte. Stasko et al. (2011) apresentaram em sua análise espacial da localização de termelétricas sobre o preço da biomassa florestal para geração de eletricidade no sudeste dos Estados Unidos, a partir de um modelo de programação linear. Os resultados demonstraram que os custos variam significativamente no espaço, implicando na viabilidade (ou não) da usina. Segundo os autores, em algumas localidades as despesas com transporte podem exceder 25% de todo investimento na bioeletricidade florestal.

Hernández, Jaeger e Samperio (2018) (AA+EF) realizaram análise de viabilidade para a bioenergia no México e apontaram os gastos com transporte como os principais responsáveis pelo aumento no tempo de retorno do investimento. Os autores destacaram que os altos investimentos podem ser explicados pela compra ou aluguel de caminhões e tratores, distâncias entre florestas e destino final, baixa integração entre áreas florestais e centros de transformação e más condições de infraestrutura rodoviária. Os autores constataram que uma diminuição de 10% no valor destinado ao transporte da madeira, reduziria o custo geral de abastecimento da biomassa para energia, resultando em receitas totais de 13,69 USD/m³ e 0,75 USD/m³ para colheita de resíduos na porção norte do país. Para a região centro-sul, os resultados identificaram um fluxo econômico negativo, com exceção dos resíduos da serraria.

Lundmark, Athanassiadis e Wetterlund (2015) apontaram que o desenvolvimento da bioeletricidade florestal esbarra nas incertezas e custos da extração e transporte de matéria-prima. Em estudo de caso para Suécia e com base em dados geograficamente

explícitos, os autores notaram maiores investimentos para a extração de madeira para geração de energia (23 a 25 €/m³) do que para a produção de madeira em tora (21 a 24 €/m³).

Sun et al. (2013) também elaboraram análises considerando investimentos iniciais, operação e manutenção, compra de matéria-prima e de transporte para instalação de termelétricas na província de Fujian, na China. Os autores apontaram resultados positivos para a implementação, com custo médio dos resíduos florestais para geração de eletricidade em 0,43 RMBkW/h (0,15 US\$kW/h). Por sua vez, Schmidt et al. (2009) notaram potencial considerável para a produção de calor e eletricidade a partir da biomassa florestal, a níveis de preço entre 52 e 57 €/MWh na Áustria, e destacaram os preços de energia, nível de emissões, bem como os custos de aquecimento urbano, como os parâmetros com maior impacto na produção

Cambero et al. (2015) indicaram que a demanda por calor e eletricidade, e o preço que o mercado está disposto a pagar por eles, têm papel importante na decisão de qual tecnologia de bioenergia instalar. Os autores identificaram a combustão em caldeira e a planta de pirólise como as tecnologias mais viáveis e estimaram o Valor Presente Líquido (VPL) de US\$ 565.488.983, para produção de bio-óleo, calor e eletricidade a partir de resíduos de colheita disponíveis e resíduos de serraria, em um intervalo temporal de 20 anos, para o Columbia Britânica no Canadá. O trabalho evidenciou que a questão espacial tem impacto sobre o investimento em bioeletricidade, através dos custos de aquisição de matéria-prima.

Em casos específicos, o cultivo de biomassa florestal pode ser mais rentável do que a prática agrícola. Bryan, Ward e Hobbs (2008) contabilizaram que o uso da biomassa florestal (E. Oleosa), no Corredor Murray na Austrália, poderia retornar um VPL de até US\$ 88 milhões a mais do que o uso do terreno para a agricultura. Outra prática que pode apresentar grande rentabilidade é a co-queima (carvão mineral + biomassa florestal) em usinas pré-existentes. Jin e Sutherland (2018) afirmaram que para os Estados Unidos, usinas híbridas gerarão, até 2042, US\$ 1,86 bilhões em produção bruta, US\$ 0,63 bilhões em atividade de valor agregado e 11.390 empregos em todo o país.

Goerndt, Aguilar e Stasko (2013) realizaram uma análise de custo para o uso da biomassa para queima combinada com o carvão mineral nos EUA. O estudo apontou que metas personalizadas em nível estadual ou municipal são ideais para utilização do recurso, o que pode servir de base para desenvolvimento em outras regiões do mundo. O trabalho

destacou que devido aos elevados custos de aquisição e transporte da madeira, a maioria das termelétricas teria que limitar a distância máxima de transporte de biomassa em 80 a 90 km, o que resulta em elevada competição entre as empresas e diminuição da capacidade de substituição do carvão mineral (menos de 10% poderia ser substituído).

Viccaro et al. (2017) realizaram estudo de viabilidade sobre o uso de água residual para cultivo de florestas e posterior destinação para geração de bioeletricidade, na região da Basilicata – Itália. Os autores notaram que o processo é economicamente vantajoso para cultivar até 1.606 ha de florestas de rápido crescimento, contribuindo para alcançar os objetivos do plano de políticas energéticas renováveis, com até 90 MW de potência para usinas termelétricas.

Além do problema do transporte, a tecnologia utilizada esteve correlacionada com a viabilidade de projetos das termelétricas. Raviv et al., (2018) buscaram a otimização econômica de sistemas de biomassa florestal para eletricidade, em Israel. Os autores identificaram que o custo tecnológico e de transporte eram as variáveis de maior significância. Dentre os processos para geração de eletricidade, a pirólise e a combustão de resíduos apresentaram maior retorno financeiro para região.

De forma semelhante, Liu, Johnson e Altman (2016) realizaram análise de sensibilidade para investigar como o investimento na queima de biomassa combinada é afetado pela escala da usina, nível de biomassa usada como matéria-prima, disponibilidade local de matéria-prima e investimento financeiro na colheita e transporte, no Missouri – EUA. Os autores observaram que os custos totais de geração são mais altos quando há utilização da co-queima, para todos os locais e cenários analisados. Assim, concluíram que seria necessária uma intervenção política para aumentar significativamente a geração de eletricidade a biomassa.

Aruga et al. (2011) ressaltaram que a escala selecionada também pode inviabilizar a instalação de sistemas, ao apontar que para a província japonesa de Tochigi, o uso de bioeletricidade é sugerido apenas em nível residencial. Todavia, em estudo de caso para a Suíça, Steubing et al. (2014) apontaram que as escalas ótimas econômicas estariam (com algumas exceções) entre 100 e 200 MW, o que demonstra que a viabilidade econômica por escala encontra associação com o espaço estudado.

Em escala global, Jiang, Searle e Siddiqui (2017) apresentaram um modelo de equilíbrio de preços espaciais (SPE) sobre o comércio de madeira destinada à geração de eletricidade. Os autores destacaram que o aumento da demanda de biocombustível florestal

nos EUA (2,37 milhões de toneladas de biocombustível) e EU (34,78 milhões de toneladas de biocombustível) resultaria em aumento no fluxo de exportações dos países da América Latina, sudeste da Ásia e a antiga União Soviética, explicitando a relação da oferta com condições edafoclimáticas favoráveis.

- **Disponibilidade e/ou Potencialidade (PD)**

A disponibilidade ou potencialidade de recursos é fundamental para o desenvolvimento da bioeletricidade florestal em escala global. Diferentes estudos buscaram compreender a dinâmica e a disposição de biomassa florestal com o destino energético, com base em anuários nacionais e, principalmente, a partir de ferramentas de análises GIS, incorporando em alguns casos, o volume existente e a taxa de crescimento anual de resíduos. Em escala global, Verón et al. (2012) destacaram a importância e o potencial da madeira suscetível a incêndios nas florestas mundiais, que evidenciou elevada quantidade de incêndios nos países tropicais. Os autores destacaram que a África e a América do Sul, foram responsáveis por 48% e 24%, respectivamente, da liberação de energia vinda de incêndios florestais, evidenciando potencial para geração de bioenergia nas regiões; todavia destacou que os custos de operação e transporte para retirada da madeira tendem a desmotivar a utilização energética. Este estudo colaborou com as conclusões de Jiang, Searle e Siddiqui (2017).

Por tratar-se de disponibilidade de recurso, os demais trabalhos foram para estudos de caso, como Goerndt et al. (2012) que mapearam a disponibilidade da biomassa florestal nos Estados Unidos e associaram este recurso às termelétricas existentes de carvão mineral, garantindo quantidades mínimas de suprimento para compensar até 19% da geração elétrica a carvão, ou 11% da bioeletricidade total nos estados do norte dos EUA.

Associando a disponibilidade de resíduos florestais com a localização de termelétricas, Pokharel et al. (2019) avaliaram a probabilidade de uma usina estar disposta a utilizar resíduos florestais como matéria-prima, com base em sua localização, utilizou um modelo de regressão logística espacial ajustado, nos Estados Unidos. Os resultados apontaram que os principais segmentos propensos a utilização dos resíduos seriam os de papel e celulose e as serrarias, se associados a uma malha rodoviária bem desenvolvida ao seu entorno. Aproximadamente 67% das fábricas de produtos compósitos de madeira, 40% das fábricas de celulose, papel e papelão, 11% das fábricas de folheados, 10% das fábricas

de post e poste e 7% das serrarias estavam dispostas a usar resíduos adicionais de madeira para produzir eletricidade, o que ressalta a importância de um setor florestal bem consolidado para o desenvolvimento da bioeletricidade.

Sánchez-García et al. (2015) criaram um banco de dados geográficos, para contribuir com uma ferramenta de apoio à investigação do potencial do combustível para madeira, na região das Astúrias (norte da Espanha). Registrou-se potencial regional de 438.954,40 t/ano de madeira, considerando condições físicas e legais de exploração, o que ressalta alto potencial para geração de eletricidade e calor, tendo em vista que nas Astúrias a demanda de lenha no setor residencial e industrial foi de 33.009 t/ano e 218.063 t/ano, respectivamente. Os autores trouxeram sua principal contribuição nas múltiplas escalas analisadas: região completa, microrregiões, municípios e áreas especificadas por grandes indústrias da madeira. Embora este trabalho se concentre, necessariamente, em uma região específica, as etapas seguidas e as informações incorporadas podem ser adaptadas para refletir as necessidades particulares de qualquer área, em qualquer escala.

Romero et al. (2019) avaliaram a disponibilidade de biomassa florestal (com ênfase na madeira do eucalipto) e agroindustrial em região do estado de São Paulo, Brasil. Os autores estimaram que a produção de madeira, a partir do eucalipto, poderiam fornecer 18% da eletricidade demandada pela região administrativa de Campinas – SP, ressaltando a importância no uso combinado da biomassa florestal com os resíduos de culturas agrícolas, como o bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados ampliaram as expandiram as análises espaciais da bioeletricidade florestal, ao demonstrar os benefícios da transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma bioeconomia.

Ruiz et al. (2019) realizaram um estudo para a União Europeia, o trabalho abordou diversas fontes energéticas. Para a biomassa florestal, os potenciais foram estimados em três cenários (alta, média e baixa disponibilidade), relacionados ao uso da terra, práticas agrícolas e áreas de preservação ambiental. A avaliação do potencial de resíduos florestais baseou-se nas estatísticas do Eurostat sobre a geração nacional de resíduos. Os autores ressaltaram que a biomassa da silvicultura ainda apresenta baixa competitividade, mas que por seu aumento de disponibilidade, deve ser um recurso importante para a matriz elétrica dos países europeus (ênfase para a França e a Alemanha), alcançando, para 2030, potencial energético de 2.300 TWh.

Embora apresentaram um levantamento de custos, Oliver e Khanna (2017) focaram suas análises, majoritariamente, no potencial da biomassa na matriz energética dos Estados

Unidos. A principal contribuição do estudo foi identificar que a biomassa (florestal e agroindustrial) poderia fornecer até 20% da eletricidade renovável necessária para atender programa estaduais de implementação das energias renováveis (RPSs - Renewable portfolio standard), até 2030.

As análises de potencial e disponibilidade apresentaram as principais contribuições sobre o ponto de vista espacial, pela associação entre oferta e demanda de insumos. Os estudos destacaram abordagens espaciais associadas a diferentes aspectos, tais como a localização de florestas (ROMERO et al., 2019), áreas de reserva ambiental (RUIZ et al., 2019), existência de indústrias madeireiras e/ou usinas termelétricas (GOERDNT et al., 2012; POKHAREL et al., 2019; SANCHEZ-GARCÍA et al., 2015), as políticas regionais ou estaduais implementadas (OLIVER; KHANNA, 2017) e a vulnerabilidade à incêndios (VERÓN et al., 2012).

Diversas análises mostraram com clareza como atribuir os locais das usinas de biomassa, a fim de minimizar o custo e maximizar a segurança do fornecimento de matéria-prima. Sun et al. (2013), de forma semelhante ao elaborado por Goerndt et al. (2012), avaliaram o potencial de geração de eletricidade a partir de recursos da biomassa florestal, considerando as florestas existentes e a taxa de crescimento anual de resíduos na província de Fujian na China. Os resultados indicaram que o potencial técnico total do uso combinado de resíduos agrícolas e florestais poderia fornecer até 21,87 TWh/ano, equivalente a aproximadamente 16,6% do consumo total de eletricidade da província, em 2010. O estudo de caso demonstrou eficácia no apoio à tomada de decisão, no planejamento da estratégia espacial da energia de biomassa e sugeriu que os sistemas de energia de biomassa utilizados na região fossem de pequena escala (até 61 MW) e descentralizados (ARUGA et al., 2011).

Schmidt et al. (2010), a partir de um modelo de programação linear mista (MIP) avaliaram a localização ótima para usinas termelétricas na Áustria, com base na disponibilidade da madeira, custos de transporte, investimento em plantas de potência e na demanda local de calor e eletricidade, identificando que a utilização da biomassa florestal permitiria produzir até 3,6% do consumo total de energia. O mesmo método foi aplicado por Cambero et al. (2015) para otimização da cadeia de suprimento de resíduos florestais na British Columbia, Canadá. O método determinou a localização, tipo e tamanho das térmicas, e supriu uma lacuna sobre a proporção ideal de biomassa para geração de eletricidade, fabricação de biocombustíveis e geração de calor. Observou-se que os

sistemas de caldeiras acopladas a um ciclo Rankine podem ser mais atraentes que a gaseificação, para regiões onde a demanda de calor é pequena comparada à de eletricidade. Com base nos planos de extração de madeira da região para os próximos 20 anos, um VPL de \$ 565.488.983 poderia ser gerado pela produção de bio-óleo, calor e energia a partir de resíduos de colheita disponíveis e resíduos de serraria.

Para atingir taxas de produção significativas da biomassa florestal, também é necessária a irrigação e uso mais eficiente do solo. A análise de potencialidade de Viccaro et al. (2017) buscou identificar áreas adequadas para a criação de sistemas de filtragem de vegetação para dimensionar plantas. Os resultados indicaram 156 áreas de rotação florestal de rápido crescimento com um VPL positivo, dentro das 39 áreas de estações de tratamento de água, o que indicou aumento da disponibilidade com associação a estas técnicas.

Aruga et al. (2011) realizaram levantamento de disponibilidade sobre a pequena região de Tochigi-Japão e foram capazes de dimensionar o tamanho da usina de recurso florestal que poderia ser instalada na localidade (5 MW). A análise de disponibilidade de Steubing et al. (2014) consistiu em dois modelos distintos: o primeiro que estimou o potencial espacial da madeira (MASSIMO) e os critérios de sustentabilidade, como restrições biológicas, sociais e econômicas, todavia os autores não admitiram esta análise como o principal fator para instalação de usinas. Por sua vez, Jin e Sutherland (2018) ponderaram que o potencial de resíduos florestais para o EUA, que chegou a 371 milhões de toneladas até 2042, o que poderia suprir a demanda do cenário básico (políticas atuais) para a bioeletricidade florestal, estimado em 3,2 milhões de toneladas.

Estudos como os de Goerndt, Aguilar e Stasko (2013), para o norte dos EUA, Liu, Johnson e Altman (2016) para o Missouri -EUA, Lundmark, Athanassiadis e Wetterlund (2015) para a Suécia e Hernández, Jaeger e Samperio (2018) para o México, contribuíram com o desenvolvimento das análises de disponibilidade, ressaltando o forte impacto do transporte sobre o uso da biomassa florestal, mesmo em localizações com elevada oferta do recurso.

Também deve-se destacar a revisão realizada por Akhtari, Sowlati e Day (2014), os autores realizaram avaliação da literatura do uso da biomassa florestal para sistemas distritais, com foco nas análises econômicas das transformações tecnológicas da biomassa. Assim como neste trabalho, destacaram forte impacto da tecnologia de conversão utilizada e dos custos de obtenção da madeira para bioenergia.

2.4 CONCLUSÃO

Este estudo sistematizou a literatura associada ao uso da biomassa florestal para geração de eletricidade no mundo. Os resultados forneceram uma visão sobre a evolução das pesquisas na área, indicando lacunas para novos estudos com ênfase, nas análises do padrão e distribuição espacial de termelétricas existentes. As análises espaciais podem contribuir como uma ferramenta de apoio aos tomadores de decisão, fornecendo orientação explícita sobre eficiência no uso da bioeletricidade florestal.

A partir das análises realizadas se observou que os estudos da bioeletricidade florestal iniciaram em 1989, porém, a partir de 2010 houve uma maior intensificação dos estudos nesta temática. Foram contabilizados 28 trabalhos para a área, sendo 26 artigos (92,86%) e 2 revisões (7,14%). As principais contribuições foram o fornecimento de recurso para geração de eletricidade em termelétricas nos Estados Unidos, Áustria e Canadá. As avaliações do espaço estiveram diretamente ligadas as análises ambientais, econômico-financeiras e de disponibilidade e potencialidade da biomassa florestal.

As análises ambientais associadas ao espaço evidenciaram eficiência do uso da biomassa florestal para diminuição das emissões de GEE, além de ser alternativa viável para o cumprimento de políticas energéticas para os países desenvolvidos. Constatou-se que o processo tecnológico de conversão representa o maior expoente das emissões de poluentes, seguido do custo de transporte de insumos e de colheita. A variável espacial esteve inserida na observação do desmatamento florestal e nas avaliações da diminuição de emissões a partir das práticas de manejo florestal e destinação à bioeletricidade.

As análises econômico-financeiras apontaram que embora o uso da biomassa florestal para geração de eletricidade tenha retorno econômico positivo, os custos de transporte apresentam-se como uma barreira ao seu desenvolvimento; assim como, os processos de colheita e tecnologias de conversão da biomassa florestal. De forma geral percebeu-se que pequenas plantas podem ser ideais, considerando a disponibilidade espacial de recursos. As avaliações espaciais mostraram-se importantes para o aspecto econômico, tendo em vista que a viabilidade de implementação dos sistemas, mostrada nos estudos, variou no espaço.

Associada diretamente à viabilidade econômica, a avaliação de potencial ou disponibilidade, também inferiu sobre a importância do espaço na bioeletricidade florestal. Os estudos apontaram existência de correlação entre a localização dos geradores de energia

e áreas com maior desenvolvimento de florestas. Os sistemas de informações georreferenciadas, associados a anuários estatísticos florestais, foram capazes de prever localizações ótimas para o uso do recurso para bioeletricidade.

2.5 REFERÊNCIAS

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; DAY, K. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 117–127, 2014.

ARUGA, K.; MURAKAMI, A.; NAKAHATA, C.; YAMAGUCHI, R.; YOSHIOKA, T. Discussion on economic and energy balances of forest biomass utilization for small-scale power generation in Kanuma, Tochigi Prefecture, Japan. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 32, n. 2, p. 571–586, 2011.

BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 479–492, 2003.

BEZERRA, M. C. DA C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, 2020.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, n. 2–3, p. 87–102, 2003.

BRIDGWATER, A. V.; TOFT, A. J.; BRAMMER, J. G. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 3, p. 181–246, 2002.

BRYAN, B. A.; WARD, J.; HOBBS, T. An assessment of the economic and environmental potential of biomass production in an agricultural region. **Land Use Policy**, v. 25, n. 4, p. 533–549, 2008.

CAMBERO, C.; SOWLATI, T.; MARINESCU, M.; ROSER, D. Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 4, p. 439–452, 2015.

CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, n. 2019, p. 741–753, 2019.

CHIDUMAYO, E. N. Land use, deforestation and reforestation in the Zambian Copperbelt. **Land Degradation & Development**, v. 1, n. 3, p. 209–216, 1989.

DANE, F. C. **Research methods**. Pacific Grove, Califórnia: Brooks/Cole Publishing Company, 1990.

DAWSON, R. How significant is a boxplot outlier? **Journal of Statistics Education**, v. 19, n. 2, p. 1–13, 2011.

DE BELLIS, N. **Bibliometrics and Citation Analysis: From the Science Citation Index to Cybermetrics**. Scarecrow Press, Lanham, MD, 2009.

DEMIRBAŞ, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357–1378, 2001.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, p. 1746–1760, 2009.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; MILES, P.; SHIFLEY, S.; SONG, N.; STELZER, H. Regional Assessment of Woody Biomass Physical Availability as an Energy Feedstock for Combined Combustion in the US Northern Region. **Journal of Forestry**, v. 110, n. 3, p. 138–148, 2012.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; SKOG, K. Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern U.S. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 348–361, 2013.

GONZÁLEZ, A.; RIBA, J. R.; PUIG, R.; NAVARRO, P. Review of micro- and small-scale technologies to produce electricity and heat from Mediterranean forests' wood chips. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 143–155, 2015.

HALL, D. O.; SCRASE, J. I. Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future? **Biomass and Bioenergy**, v. 15, n. 4–5, p. 357–367, 1998.

HERNÁNDEZ, U. F.; JAEGER, D.; SAMPERIO, J. I. Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4, p. 1–19, 2018.

HU, Q.; YANG, H.; XU, H.; WU, Z.; LIM, C. J.; BI, X. T.; CHEN, H. Thermal behavior and reaction kinetics analysis of pyrolysis and subsequent in-situ gasification of torrefied biomass pellets. **Energy Conversion and Management**, v. 161, n. January, p. 205–214, 2018.

INGRAO, C.; BANECETTI, J.; BEZAMA, A.; BLOK, V.; GOGLIO, P.; KOUKIOS, E. G.; LINDNER, M.; NEMECEK, T.; SIRACUSA, V.; ZABANIOTOU, A.; HUISINGH, D. The potential roles of bio-economy in the transition to equitable, sustainable, post fossil-carbon societies: Findings from this virtual special issue. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 471–488, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: 10 de julho de 2020.

JIANG, W.; SEARLE, S.; SIDDIQUI, S. Analysis of the global wood-chip trade's

response to renewable energy policies using a spatial price equilibrium model. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 3, p. 505–520, 2017.

JIN, E.; SUTHERLAND, J. W. An integrated sustainability model for a bioenergy system: Forest residues for electricity generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 10–21, 2018.

KALT, G.; MAYER, A.; THEURL, N. C.; LAUK, C.; ERB, K. H.; HABERI, H. Natural climate solutions versus bioenergy: Can carbon benefits of natural succession compete with bioenergy from short rotation coppice? **GCB Bioenergy**, v. 11, n. 11, p. 1283–1297, 2019.

KUMAR, L.; SINHA, P.; TAYLOR, S.; ALGURASHI, A. F. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 097696, 2015.

LEWTAS, J. Air pollution combustion emissions: Characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. **Mutation Research - Reviews in Mutation Research**, v. 636, n. 1–3, p. 95–133, 2007.

LINDE, K.; WILLICH, S. N. How objective are systematic reviews? Differences between reviews on complementary medicine. **Journal of the Royal Society of Medicine**, v. 96, n. 1, p. 17–22, 2003.

LIU, Z.; JOHNSON, T. G.; ALTMAN, I. The moderating role of biomass availability in biopower co-firing — A sensitivity analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 523–532, 2016.

LUNDMARK, R.; ATHANASSIADIS, D.; WETTERLUND, E. Supply assessment of forest biomass - A bottom-up approach for Sweden. **Biomass and Bioenergy**, v. 75, p. 213–226, 2015.

MAZAHERI, N.; AKBARZADEH, A. H.; MADADIAN, E.; LESFRUD, M. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 671–688, 2019.

MESFUN, S.; LEDUC, S.; PATRIZIO, P.; WETTERLUND, E.; PONCE, A. P.; LAMMENS, T.; STARITSKY, I.; ELBERSEN, B.; LUNDGREN, J.; KRAXNER, F. Spatio-temporal assessment of integrating intermittent electricity in the EU and Western Balkans power sector under ambitious CO₂ emission policies. **Energy**, v. 164, n. 2018, p. 676–693, 2018.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy and Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

OLIVER, A.; KHANNA, M. Demand for biomass to meet renewable energy targets in the United States: implications for land use. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 9, p. 1476–1488, 2017.

OPENSHAW, K. Biomass energy: Employment generation and its contribution to poverty alleviation. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 3, p. 365–378, 2010.

PAREDES-SÁNCHEZ, J. P.; OCHOA, L. M. L.; GONZÁLEZ, L. M. L.; CASA, J. L. H.; BERNAT, J. X. Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 553–568, 2019.

POKHAREL, R.; GRALA, R. K.; GREBNER, D. L.; COOK, W. Mill Willingness to Use Logging Residues to Produce Electricity: A Spatial Logistic Regression Approach. **Forest Science**, v. 65, n. 3, p. 277–288, 2019.

PRADHAN, P.; ARORA, A.; MAHAJANI, S. M. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. **Energy for Sustainable Development**, v. 43, p. 1–14, 2018.

RANDERSON, J. T.; CHEN, Y.; VAN DER WERF, G. R.; ROGERS, B. M.; MORTON, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. **Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences**, v. 117, n. 4, 2012.

RANIUS, T.; HÄMÄLÄINEN, A.; EGNELL, G.; OLSSON, B.; EKLÖF, K.; STENDAHL, J.; RUDOLPHI, J. The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis. **Journal of Environmental Management**, v. 209, p. 409–425, 2018.

RAVIV, O.; BROITMAN, D.; AYALON, O.; KAN, I. A regional optimization model for waste-to-energy generation using agricultural vegetative residuals. **Waste Management**, v. 73, p. 546–555, 2018.

ROMERO, C. W. A. S.; BERNI, M. D.; FIGUEIREDO, G. K. D. A.; FRANCO, T. T.; LAMPARELLI, R. A. C. Assessment of agricultural biomass residues to replace fossil fuel and hydroelectric power energy: A spatial approach. **Energy Science and Engineering**, v. 7, n. 6, p. 2287–2305, 2019.

RUIZ, P. C.; NIJS, W.; TARVYDAS, D.; SGOBBI, A.; ZUCKER, A.; PILLI, R. et al. ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, n. September 2019, p. 100379, 2019.

SABERI, M. K.; SAHEBI, S.; ZEREHSAZ, M. Visualization of the Koomesh journal between 2006 and 2017: A bibliometric study. **Koomesh Journal**, v. 22, n. 1, p. 1–9, 2020.

SADHUKHAN, J.; HERNANDEZ, E. M.; MURPHY, E. J.; NG, D. K. S.; HASSIM, M. H. et al. Role of bioenergy, biorefinery and bioeconomy in sustainable development: Strategic pathways for Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. April, p. 1966–1987, 2018.

SÁNCHEZ-GARCÍA, S.; CANGA, E.; TOLOSANA, E.; MAJADA, J. A spatial analysis of woodfuel based on WISDOM GIS methodology: Multiscale approach in Northern Spain. **Applied Energy**, v. 144, p. 193–203, 2015.

SCHMIDT, J.; LEDUC, S.; DOTZAUER, E.; KIRDERMANN, G.; SCHMID, E. Potential of biomass-fired combined heat and power plants considering the spatial distribution of biomass supply and heat demand. **International Journal of Energy Research**, v. 34, n. 11, p. 970–985, 2010.

SMYTH, C. E.; SMILEY, B. P.; MAGNAN, M.; BIRDSEY, R.; DUGAN, A. J.; OLGUIN, M.; MASCORRO, V. S.; KURZ, W. A. Climate change mitigation in Canada's forest sector: A spatially explicit case study for two regions. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2018.

SOLOMON, B.; LUZADIS, V. A. (Ed.). **Renewable energy from forest resources in the United States**. Routledge, 2008.

STASKO, T. H.; CONRADO, R. J.; WANKERL, A.; LABATUT, R.; TASSEFF, R.; MANNION, J. T.; GAO, H. O.; SANBORN, S. D.; KNOTT, G. Mapping woody-biomass supply costs using forest inventory and competing industry data. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 263–271, 2011.

STEUBING, B.; BALLMER, I.; GASSNER, M.; GERBER, L.; PAMPURI, L.; BISCHOF, S.; THESS, E.; ZAH, R. Identifying environmentally and economically optimal bioenergy plant sizes and locations: A spatial model of wood-based SNG value chains. **Renewable Energy**, v. 61, p. 57–68, 2014.

SUN, Y.; WANG, R. LIU, J.; XIAO, L.; LIN, Y.; KAO, W. Spatial planning framework for biomass resources for power production at regional level: A case study for Fujian Province, China. **Applied Energy**, v. 106, p. 391–406, 2013.

TILLMAN, D. A. Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, n. 6, p. 365–384, 2000.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, set. 2003.

UPRETI, B. R.; VAN DER HORST, D. National renewable energy policy and local opposition in the UK: The failed development of a biomass electricity plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 1, p. 61–69, 2004.

VAN RAAN, A. F. J. For Your Citations Only? Hot Topics in Bibliometric Analysis. **Measurement: Interdisciplinary Research & Perspective**, v. 3, n. 1, p. 50–62, jan. 2005.

VERÓN, S. R.; JOBBÁGY, E. G.; DI BELLA, C. M.; PARUELO, J. M.; JACKSON, R. B. Assessing the potential of wildfires as a sustainable bioenergy opportunity. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 634–641, 2012.

VICCARO, M.; COZZI, M.; CANANI, D.; MASI, S.; MANCINI, I. M.; CAIVANO, M.; ROMANO, S. Wastewater reuse: An economic perspective to identify suitable areas for poplar vegetation filter systems for energy production. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 12, p. 1–14, 2017.

WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, maio 2016.

WANG, S.; LUO, K. Life expectancy impacts due to heating energy utilization in China: Distribution, relations, and policy implications. **Science of the Total Environment**, v. 610–611, p. 1047–1056, 2018.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. 13–23, 2002.

WHITE, M. D.; MARSH, E. E. Content analysis: A flexible methodology. **Library Trends**, v. 55, n. 1, p. 22–45, 2006.

3 ARTIGO 2 – LOCALIZAÇÃO E CONCENTRAÇÃO BRASILEIRA DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL (2000-2019)

RESUMO

A geração de eletricidade a partir da biomassa das florestas está relacionada com a dinâmica regional do setor florestal. O Brasil detém vantagens comparativas favoráveis para que os recursos florestais sejam uma alternativa viável a incrementar a oferta interna de energia. Em busca de compreender os aspectos regionais das termelétricas de base florestal e orientação de políticas públicas, este artigo analisou a localização e concentração brasileira da bioeletricidade florestal, no período de 2000 a 2019. Para medir os efeitos locacionais e concentração regional foram utilizados os dados da outorga das termelétricas de biomassa florestal, disponíveis na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e empregou os seguintes indicadores: Quociente Locacional (QL), Razão de Concentração [$CR(k)$], Índice de Herfindahl-Hirschman (HHI), o Índice de Hoover (H) e o coeficiente de Gini (G). Os principais resultados mostraram que a oferta de eletricidade da biomassa florestal brasileira aumentou de 562,90 MW e 11 termelétricas, em 2000, para 3.532,61 MW e 115 termelétricas, em 2019, proporcionando crescimento médio de 13,20% a.a. das termelétricas e 10,15% a.a. da potência outorgada. O QL inferiu alta oferta energética a partir do licor negro (Rio Grande do Sul, Paraná, Espírito Santo, Bahia, Maranhão e Mato Grosso do Sul) e de resíduos florestais, em diversos estados, com destaque para a região Norte. Para nível estadual, os índices $CR(4)$, $CR(8)$ e HHI apontaram tendência de desconcentração e os principais estados foram Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Dentre as firmas, destacaram-se as termelétricas de licor negro, sendo a Aracruz e Suzano Mucuri as principais nos anos iniciais e a Klabin Celulose a partir de 2013. O ingresso de novas térmicas resultou em um cenário de baixa concentração para o $CR(4)$, $CR(8)$ e HHI . Já o H e G indicaram um leve aumento na desigualdade. Conclui-se que este dado o baixo número de participantes, em nível estadual e entre as termelétricas, notou um cenário de queda na concentração, motivado pela entrada de novos participantes. Este estudo possibilitou o entendimento da disponibilidade brasileira de bioeletricidade florestal e de sua organização no mercado.

Palavras-chave: Bioenergia, Biomassa florestal, Economia regional.

ARTICLE 2 - LOCATION AND CONCENTRATION OF FOREST BIOELECTRICITY IN BRAZIL (2000-2019)

ABSTRACT

The generation of electricity from forests is related to the regional dynamics of the forestry sector. Brazil has favorable comparative advantages so that forest resources are a viable alternative to increase the internal energy supply. In order to understand the regional aspects of forest-based thermoelectrics and public policy guidance, this article analyzed the location and Brazilian concentration of forest bioelectricity, in the period from 2000 to 2019. To measure the locational effects and regional concentration, data from the granting of forest biomass thermoelectric plants, available at the National Electric Energy Agency (ANEEL) and used the following indicators: Locational Quotient (QL), Concentration Ratio [$CR(k)$], Herfindahl-Hirschman Index (HHI), the Index Hoover's (H) and Gini's coefficient (G). The main results showed that the supply of Brazilian forest biomass electricity increased from 562.90 MW and 11 thermoelectric plants in 2000 to 3,532.61 MW and 115 thermoelectric plants in 2019, providing an average growth of 13.20% p.a. thermoelectric plants and 10.15% p.a. the installed installed power. QL inferred a high energy supply from black liquor (Rio Grande do Sul, Paraná, Espírito Santo, Bahia, Maranhão and Mato Grosso do Sul) and forest residues, in several states, with emphasis on the North region. For the state level, the $CR(4)$, $CR(8)$ and HHI indices showed a trend towards desconcentration and the main states were Paraná, Bahia, Espírito Santo and Mato Grosso do Sul. Among the firms, black liquor thermoelectric plants stood out, being Aracruz and Suzano Mucuri were the main ones in the initial years and Klabin Celulose from 2013. The entry of new thermal plants resulted in a low concentration scenario for $CR(4)$, $CR(8)$ and HHI . H and G indicated a slight increase in inequality. It is concluded that given the low number of participants, at the state level and among the thermoelectric plants, it noticed a scenario of decrease in concentration, motivated by the entry of new participants. This study made it possible to understand the Brazilian availability of forest bioelectricity and its organization in the market.

Keywords: Bioenergy, Forest biomass, Regional economy.

3.1 INTRODUÇÃO

Os produtos florestais foi o primeiro recurso energético utilizado pela humanidade e seu uso na antiguidade se associou a cocção de alimentos e aquecimento. Atualmente, com o crescente aumento energético mundial e em atendimento da COP21, surgem novas formas de consumo sob forma de energia da biomassa com aplicações industriais, seja por meio de biocombustíveis e de geração de eletricidade. Em 2018, a oferta mundial de energia primária foi 14.279,57 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), atribuindo a biomassa 9,29% (1.327 milhões tep) do fornecimento. Embora significativo para a matriz energética, grande parte da biomassa ainda é subutilizada, sendo cerca de 90% de seu potencial energético associado às florestas (DA COSTA et al., 2018; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020; WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

O Brasil está entre maiores produtores mundiais de madeira, devido as condições edafoclimáticas e o aprimoramento técnico do setor nas últimas décadas. Em 2019, a produção nacional madeireira foi 281,52 x 10⁶ m³, onde 43,85% foi utilizado para combustível. A oferta interna de energia foi 294,04 milhões tep e 8,75% foi da biomassa florestal (carvão vegetal e a lenha). Para o setor elétrico, a disponibilidade nacional foi 172,34 GW, dos quais 1,88% da biomassa florestal (licor negro 1,4%, dos resíduos florestais 0,26%, gás de alto forno 0,07%, lenha 0,05% e carvão vegetal 0,03%) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA DE ELÉTRICA - ANEEL, 2019; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2020; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2020).

O uso energético da biomassa florestal está relacionado com a distribuição regional da indústria madeira e das florestas (nativas e plantadas). O acesso fácil da matéria-prima barateia o custo e tem impacto na localização de termelétricas de base florestal. A localização otimizada das térmicas aumentam as vantagens comparativas e transformam em vantagens competitivas (GOERNDT; AGUILAR; SKOG, 2013; POKHAREL; GRALA; GREBNER, 2017; PORTER, 2000). Os estudos da economia regional auxiliam na caracterização e otimização de uma atividade. No início do século XIX, as análises regionais remontam a teoria da localização de Thünen (1826), que explicou a localização da produção agrícola com fatores locais e considerou a base da aglomeração de atividades. A partir disso, diversos economistas buscam identificar as razões dos padrões de localização e, ou, avaliar seus efeitos (ZHENG; LIN, 2018). Souza (1981) mostrou que o

fator locacional fornece suporte para compreender estruturas industriais, do aproveitamento de recursos naturais e podendo ser aplicado em diversos setores. A Economia Regional Clássica utiliza as medidas de localização para identificar os padrões de concentração ou dispersão espacial de atividades em um determinado período. Monastério (2011) afirmou que os indicadores sintetizam em valores, aspectos complexos dos fenômenos do espaço. Yi (2016) e An e Wan (2018) destacaram que o quociente locacional (QL) infere o padrão de localização para avaliar as conglomerações e localização dentro de uma região.

Já a economia industrial possibilita entender a estrutura de mercado em um setor. Os indicadores de concentração são capazes de inferir mudanças no porte de empresas, entradas ou saídas de participantes e fusões, pois todas essas ações causam mudança do nível de concentração (HANNAH; KAY, 1977; MIRZA, 2019). No setor energético, a concentração econômica interfere na regulamentação de mercado, auxiliando a instituição de políticas setoriais de aumento da concorrência entre os integrantes (BUSU, 2020). Wolak (2015) destacou que uma estrutura competitiva para oferta de eletricidade impacta em incentivos e melhores tarifas econômicas aos usuários do sistema. Segundo Kamiński (2012) o setor energético tende a se tornar concentrado, devido à alta intensidade de capital, barreiras à entrada, restrições de transmissão e à possibilidade limitada de armazenamento de potência. Deve-se notar que a demanda altamente inelástica da eletricidade, pode dificultar a mensuração da concentração.

A literatura apresenta diversos ensaios para estudos regionais, embora poucos destinados ao setor de energia, destacando-se: Otsuka (2016) que avaliou a demanda regional de energia no Japão, a partir do QL ; Purwanto et al. (2018) utilizaram o QL e de medidas de posição competitiva (CP) para avaliar os setores de água, energia e alimentos da Indonésia; Zheng e Lin (2018) avaliaram a existência de aglomerações, por meio do QL , entre indústrias de papel da China, observando o impacto da eficiência energética do setor e Zhao e Lin (2019) que realizaram o mesmo estudo no setor têxtil, da China. Os estudos de concentração industrial são amplamente aplicados em diversos segmentos. Dentre os ensaios para o setor florestal Coelho Junior et al. (2019a) para o valor bruto de produção da lenha no estado da Paraíba, Brasil, Coelho Junior et al. (2019b) para avaliação da concentração da produção de carvão vegetal, na Paraíba, Brasil e Simioni et al. (2017) para evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. Para análises do setor elétrico destacaram-se: Busu (2020) analisou a concentração da

oferta de eletricidade da biomassa na Romênia; Ciarreta; Nasirov e Silva (2016) observaram as mudanças estruturais e regulatórias do mercado elétrico da Espanha; Ioannidis et al. (2019) estimaram a diversidade e concentração do fornecimento de energia para 44 ilhas no mundo e Kamiński (2012) com o ensaio sobre as perspectivas da oferta de potência elétrica na Polônia.

A fim de compreender a dinâmica regional e de mercado da bioeletricidade florestal brasileiro e para auxiliar a orientação de políticas públicas do setor, este artigo analisou a localização e concentração brasileira da bioeletricidade florestal, no período de 2000 a 2019.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Objeto de estudo

As termelétricas de biomassa florestal estão disponíveis nos Sistema de Informações de Geração da Aneel (SIGA) da ANEEL, no período de 2000 a 2019. As usinas estão classificadas em nível 1 (biomassa florestal) e nível 2 (lenha, carvão vegetal, gás de alto forno, licor negro e resíduos florestais). As informações das outorgas dessas térmicas foram obtidas da biblioteca digital (Sophia) da ANEEL.

Realizou-se uma análise de conjuntura a partir da espacialização das termelétricas da biomassa florestal nas regiões brasileiras para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019, além da quantidade e a potência outorgada (MW) (nível 1 e 2) para os mesmos períodos. Também, foi utilizado a Taxa de crescimento geométrica (TGC), Equação 1, para observar as alterações (aumento e diminuição) na oferta (2000-2019, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2015, 2015-2019) (CUENCA; DOMPIERI, 2016).

$$TGC[\%] = \left[\sqrt{\frac{V_F}{V_0}} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

em que, V_F = a quantidade ou potência outorgada (MW) da biomassa florestal no ano final; V_0 = a quantidade ou potência do ano inicial; Δt é a variação temporal (expressa em anos).

3.2.2 Medidas locacionais, de concentração e de desigualdade

Crawley, Beynon e Munday (2013) destacaram que as análises locacionais são importantes para a identificação de complexos industriais e demais atividades econômicas no espaço. Assim, foi aplicado o Quociente Locacional (QL) para verificação da localização da oferta de bioeletricidade florestal no Brasil. Para a concentração industrial, foram utilizados diversos indicadores, abordando a complexidade e as dimensões associadas ao mercado. As medidas de concentração são importantes na determinação de estruturas de mercado, sendo capazes de avaliar o domínio de uma empresa ou o conjunto delas sobre as atividades econômicas de uma região específica (CHARUMBIRA; SUNDE, 2010). Estas podem ser classificadas como parciais [$CR(k)$] e sumárias (HHI , H e G). Os índices parciais consideram uma parcela dos dados, enquanto os sumários utilizam todos os valores envolvidos no estudo (COELHO JUNIOR et al., 2019a). Para medida de desigualdade utilizou-se o coeficiente de Gini, usual na análise de renda entre populações.

Quociente Locacional (QL)

O quociente locacional (QL) (Equação 2) relaciona a participação relativa do segmento produtivo na economia de uma dada região com a participação relativa desse mesmo segmento em uma região de referência; tendo em vista que o quociente está em função da potência outorgada da bioeletricidade florestal (nível 1 e 2), ele aponta a localização relativa da potência em determinadas regiões (PIACENTI; ALVES; LIMA, 2008). Piacenti, Alves e Lima (2008) classificaram o índice: oferta muito relevante ($QL \geq 1,00$), de relevância média ($0,50 \leq QL < 1,00$) ou de relevância fraca ($QL < 0,50$) (PIACENTI; ALVES; LIMA, 2008).

$$QL = \frac{E_{ij}/E_j}{E_i/E} \quad 2)$$

em que, E_{ij} = Potência outorgada da biomassa florestal nível 2, no estado j ; E_j = Potência outorgada da biomassa florestal nível 1, no estado j ; E_i = Potência outorgada da biomassa florestal nível 2, no Brasil e E = Potência outorgada da biomassa florestal nível 1, no Brasil.

Razão de concentração [CR(k)]

A Razão de Concentração [CR(k)], Equação 3, analisa a participação de mercado dos k ($k = 1, 2, \dots, n$) estados ou termelétricas de base florestal no Brasil (BAIN, 1959).

$$CR(k) = \sum_{i=1}^k S_i \quad (3)$$

em que, i = Estado ou termelétrica da biomassa florestal observada; S_i = participação i dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal) ou a participação i das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal).

Calculou a concentração dos quatro maiores [CR(4)] e dos oito maiores [CR(8)] estados e termelétricas de base florestal, de 2000 a 2019, e classificou de acordo com a Tabela 3.1. Também, foi avaliado o principal [CR(1)] e os dois principais [CR(2)].

Tabela 3.1. Classificação da Razão Concentração dos quatro maiores [CR(4)] e dos oito maiores [CR(8)] participantes.

Nível de concentração	Quatro maiores	Oito Maiores
Muito Alto	$CR(4) > 75\%$	$CR(8) > 90\%$
Alto	$65\% \leq CR(4) < 75\%$	$85\% \leq CR(8) < 90\%$
Moderadamente Alto	$50\% \leq CR(4) < 65\%$	$70\% \leq CR(8) < 85\%$
Moderadamente Baixo	$35\% \leq CR(4) < 50\%$	$45\% \leq CR(8) < 70\%$
Baixo	$CR(4) < 35\%$	$CR(8) < 45\%$

Fonte: Bain, 1959.

Índice de Herfindahl-Hirschman (HHI)

O Índice Herfindahl-Hirschman (HHI), Equação 4, avaliou a concentração, com base na participação dos estados ou termelétricas ao quadrado, atribuindo-se peso maior para os estados com parcela mais representativa. Para $HHI = 1/n$ (Limite Inferior – LI), há um mercado atomizado, enquanto $HHI = 1$ indica monopólio (HIRSCHMAN, 1964; SLEUWAEGEN; DEHANDSCHUTTER, 1986; TUSHAJ, 2010).

$$HHI = \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (4)$$

em que, n = número de participantes; i = Estado ou termelétrica da biomassa florestal observada; S_i = participação i dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de

base florestal) ou a participação i das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal). Resende (1994) propôs o HHI ajustado (HHI') para avaliações intertemporais (Equação 5) que vai de 0 a 1. Para valores de $HHI' < 0,10$ mercado atomizado, $0,10 \leq HHI' \leq 0,15$ mercado não concentrado, $0,15 \leq HHI' \leq 0,25$ moderadamente concentrado e $HHI' > 0,25$ concentrado.

$$HHI' = \frac{1}{n-1}(n * HHI - 1); n > 1 \quad (5)$$

Índice de Hoover (H)

O índice de Hoover (H), Equação 6, também conhecido como índice Robin Hood em estudos de desigualdade de renda, é empregado para identificar e medir o processo de concentração econômica em um determinado espaço (ISARD, 1960; MULLIGAN, 1991).

$$H = \frac{\left[\sum_{i=1}^n |S_i - (1/n)| \right]}{2} \quad (6)$$

em que, n = número de participantes; i = Estado ou termelétrica da biomassa florestal observada; S_i = participação i dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal) ou a participação i das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal). O índice de concentração de Hoover varia entre 0 e 1. Para $H = 0$, há uma distribuição uniforme, ou seja, baixa concentração; enquanto, $H = 1$, indica distribuição concentração elevada (monopólio) (HUANG; LEUNG, 2009; WENG, 1998).

Coefficiente de Gini (G)

O Índice de Gini (G), proposto por Gini (1912), na sua origem foi utilizado para análises de desigualdade social, com base na renda populacional. Atualmente, o G (Equação 7) aplica-se em diferentes áreas do conhecimento e pode ser utilizado para verificar a desigualdade da oferta de geração de eletricidade a partir da biomassa florestal.

$$G = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (S_{ij} + S_i) \right]}{n} \quad (7)$$

em que, n = número de participantes; i = Estado ou termelétrica da biomassa floresta observada; S_i = participação i dos Estados (com base na capacidade outorgada, MW, de

base florestal) ou a participação i das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal); S_{ij} = participação cumulativa i dos Estados (com base no quantitativo total de termelétricas de base florestal) ou a participação i das termelétricas (com base na capacidade outorgada, MW, de base florestal).

O G pode ser classificado como de desigualdade nula a fraca (0,000-0,250), desigualdade fraca a média (0,251 – 0,500), desigualdade média a forte (0,501 – 0,700), desigualdade forte a muito forte (0,701 – 0,900) e desigualdade muito forte a absoluta (0,900 – 1,000) (GINI, 1912).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3.1 apresenta a evolução da distribuição espacial brasileira das termelétricas de base florestal, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Em 2000 havia 11 termelétricas no território brasileiro, distribuídas nas regiões Sul (45,45%), Sudeste (27,27%), Nordeste (18,18%) e Norte (9,10%). Em 2005 aumentou para 50 térmicas outorgadas e um incremento de 8,29% a.a. em relação a 2000, distribuído no Sul (44,00%), Sudeste (30,00%), Norte (12,00%), Nordeste (8,00%) e Centro-Oeste (6,00%). Com a expansão da indústria nacional de celulose e papel e a implementação de políticas energéticas desenvolvidas, após os déficits de eletricidade dos anos de 2001 e 2002, impactaram positivamente na autoprodução de eletricidade. Broughel (2019) destacou que a relação entre políticas públicas e a existência de um setor de celulose e papel bem consolidado, resultando num melhor aproveitamento energético nas indústrias de base florestal.

Em 2010 contabilizou 71 termelétricas outorgadas e um crescimento de 9,16% a.a. (2005 a 2010); a região Sul com 26 (36,62%), seguindo o Sudeste com 21 (29,58 %), o Norte com 10 (14,08%), o Centro-Oeste com 8 (11,27%) e o Nordeste com (8,45%). Em 2015 totalizou 93 termelétricas e incremento de 6,98% a.a. em relação a 2010; destacando o aumento no Centro-Oeste (15,02% a.a.). As térmicas foram distribuídas nas regiões: Sul (30,11%), Sudeste (31,11%), Norte (16,13%), Centro-Oeste (15,05%) e Nordeste (8,60%).

Em 2019, houve 115 termelétricas, com aumento de 5,45% a.a., com base em 2015. O Sul foi a principal região, com 35 usinas (37,63%); completaram o ranking: Sudeste (33,33%), Centro-Oeste (21,51%) e Norte (21,51%) e Nordeste (9,68%). Entre 2000 e 2019 foram 104 novas termelétricas, com aumento médio de 13,15% a.a.

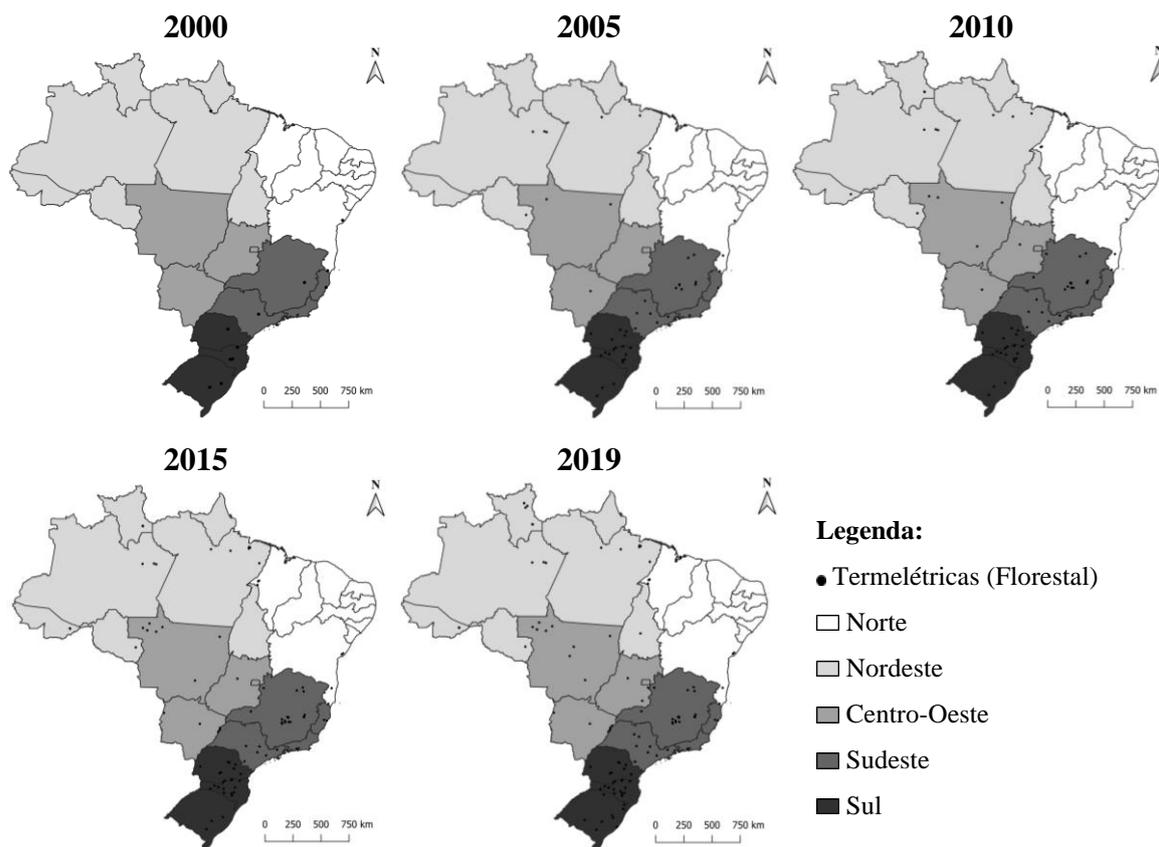


Figura 3.1. Evolução da distribuição espacial brasileira das termelétricas de base florestal, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Tabela 3.2 apresenta a evolução das termelétricas de base florestal (fontes nível 1 e 2) e potência outorgada (MegaWatts – MW), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Em 2000, a oferta brasileira de bioeletricidade florestal foi 562,90 MW, sendo 9 termelétricas de licor negro (546,10 MW) e 2 de resíduos florestais (16,80 MW). O licor negro foi a primeira fonte de biomassa florestal a ser outorgada, no Brasil, com o registro da Klabin Correia Pinto, em Santa Catarina (1,56 MW). Em 2005, apresentou-se 1.065,65 MW outorgados, com aumento de 17,30% a.a., em relação a 2000. Destacou os resíduos florestais com incremento de 97,05% a.a. A capacidade outorgada foi dividida em: LN (71,28%), RF (23,77%), GAF (2,32%), Le (0,38%) e CV (2,26%). Para a quantidade foram 50 termelétricas distribuídas entre: LN (24,00%), RF (60,00%), GAF (8,00%), Le (2,00%) e CV (6,00%)

Para 2010 registrou 1.690,93 MW, com aumento de 12,23% a.a., com relação a 2005. A potência esteve distribuída em: LN (68,11%), RF (21,94%), GAF (7,04%), Le

(0,5%) e CV (2,37%). Da quantidade, foram 71 termelétricas: LN (18,31%), RF (59,15%), GAF (12,68%), Le (2,82%) e CV (7,04 %). Para o intervalo (2005-2010) destacou a incorporação da Fibria MS, em 2008, com 175,10 MW de capacidade a base do licor negro e a instalação de 12 novas usinas de resíduos florestais. Fracaro et al. (2012) ressaltaram que entre 1994 e 2010 a autoprodução de eletricidade nas indústrias de celulose e papel aumentaram em 11%, chegando a 51,0% da demanda elétrica do setor, em 2010. Do gás de alto forno contabilizou-se instalação de 5 usinas, sendo a Usipar (63,15 MW) a principal; também houve expansão de potência das usinas Vetorial e Siderpa.

Tabela 3.2. Evolução das termelétricas de base florestal (fontes nível 1 e 2) e potência outorgada (MW), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.

	2000		2005		2010		2015		2019	
	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde
LN	546,10	9	759,55	12	1.151,68	13	2.276,05	16	2.545,63	17
RF	16,80	2	253,30	30	371,05	42	518,81	56	745,81	70
GAF	-	-	24,70	4	119,10	9	124,10	10	127,70	12
Le	-	-	4,00	1	9,00	2	9,00	2	86,71	8
CV	-	-	24,10	3	40,10	5	56,10	9	48,20	8
Floresta	562,90	11	1.065,65	50	1.690,93	71	2.984,06	93	3.532,61	115

Legenda: Pot = Potência outorgada, Qde = Quantidade, LN = Licor Negro, RF = Resíduos Florestais, GAF = Gás de Alto Forno, Le = Lenha, CV = Carvão Vegetal.

Fonte: ANEEL, 2020.

Em 2015, a potência da bioeletricidade florestal alcançou 2.984,06 MW, no intervalo 2010 a 2015, observou o maior aumento da potência, com acréscimo de 1.293,13 MW (15,26% a.a.). A capacidade outorgada esteve dividida entre: LN (76,27%), RF (17,39%), GAF (4,16%), Le (0,3%), e CV (1,88%). Para quantidade, foram 93 termelétricas, sendo: LN (17,20%), RF (60,22%), GAF (10,75%), Le (2,15%) e CV (9,68%). Para 2019 a capacidade outorgada foi 3.532,61 MW, com aumento de 4,31% a.a., em relação a 2015. Dividiu em: LN (72,06%), RF (21,11%), GAF (3,61%), Le (2,45%) e CV (1,36%). Foram 115 termelétricas outorgadas, que estiveram distribuídas entre LN (14,78%), RF (60,87%), GAF (10,43%), Le (6,96%) e CV (6,96%).

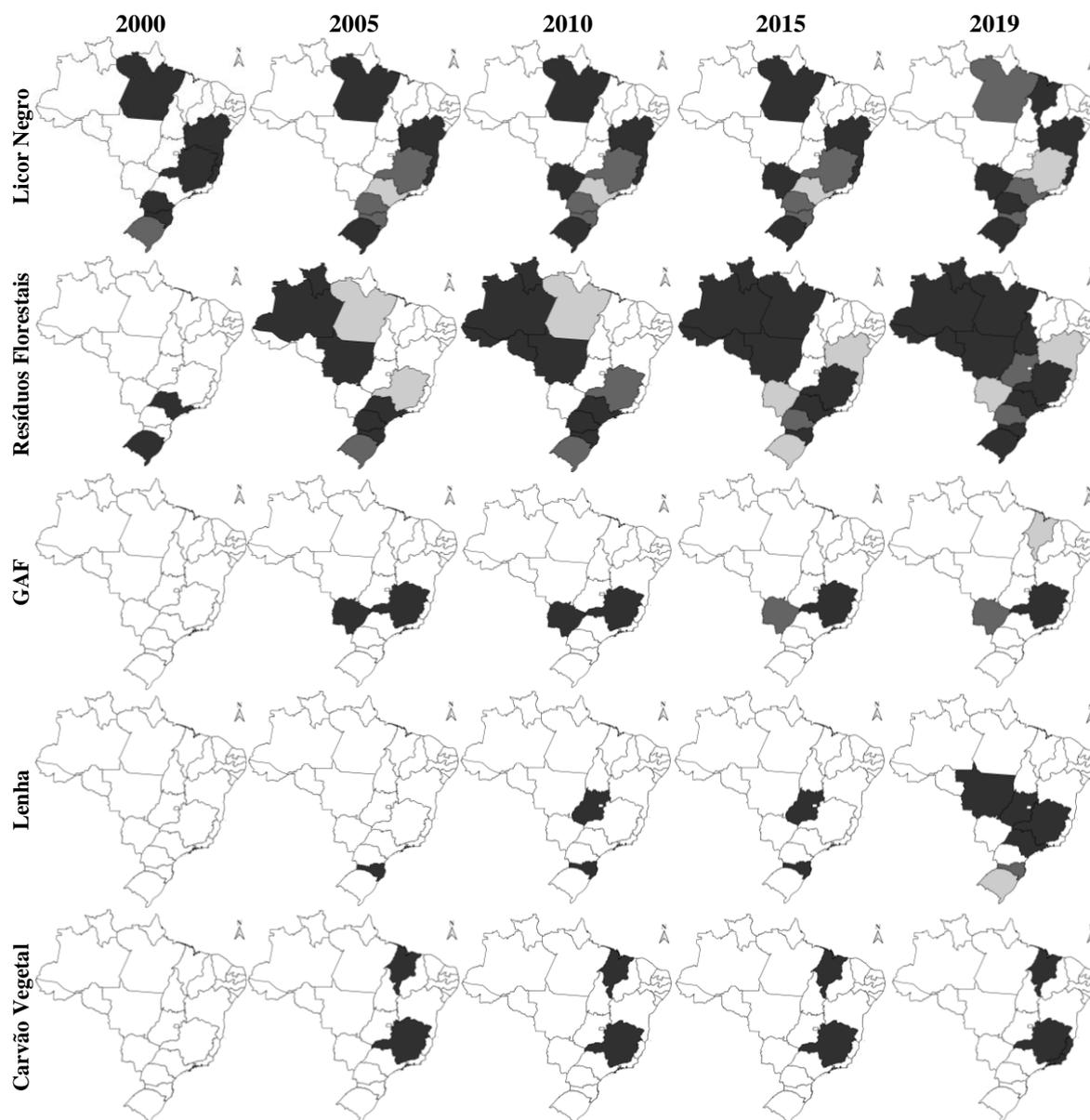
O intervalo 2000 a 2019 registrou crescimento de 13,15% a.a. para a quantidade de termelétricas e de 10,15% a.a. para a potência outorgada. Do nível 2, os resíduos florestais apresentaram o maior acréscimo do número de térmicas (20,58% a.a.), seguido do gás de alto forno (15,74% a.a., de 2002 a 2019) e do carvão vegetal e lenha, ambos com

crescimento de 13,01% a.a. (2002 a 2019). Para a capacidade outorgada os resíduos florestais também apresentaram o maior crescimento (22,09% a.a.), seguido da lenha com 19,84% a.a. (2002 a 2019), do gás de alto forno (11,79% a.a., de 2002 a 2019), do licor negro (8,44% a.a., de 2000 a 2019) e do carvão vegetal (8,06% a.a., de 2002 a 2019).

A Figura 3.1 apresenta a evolução do Quociente Locacional (*QL*) nos Estados brasileiros para potência outorgada da biomassa florestal, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. O *QL* evidenciou alto grau de localização da oferta, com destaque para os resíduos florestais e licor negro. Os anos iniciais da análise não registraram muitos participantes, que tornou a localização mais alta nos poucos estados geradores. Em 2000, sete estados já apresentavam participação para o licor negro: ES (142,90 MW), BA (105,60 MW), MG (100,00 MW), PA (55,00 MW), PR (48,85 MW), RS (47,00 MW) e SC (46,75 MW). A unidade com maior *QL* médio foi o Espírito Santo, 1,31 (2000 – 2019), resultante da baixa oferta de outras fontes florestais, comparado com a disponibilidade da usina Aracruz Celulose. Em seguida ao ES, o ranking do *QL* foi composto por: BA (1,30, de 2000 a 2019), MS (1,25, de 2008 a 2019), PA (1,20, de 2000 a 2019), MA (1,19, de 2012 a 2019) e RS (1,13, de 2000 a 2019).

A localização da bioeletricidade do licor negro esteve associada à distribuição das grandes indústrias do setor de papel e celulose, como apontado por Marques (2015) e a produção de madeira das florestas plantadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Árvores - IBA (2018) cerca de 80% das florestas plantadas de eucalipto e 100% das de pinus estiveram localizadas na porção centro sul do país, com destinação focada na produção de papel e celulose, painéis de madeira e pisos laminados, madeira serrada e carvão vegetal.

Para os resíduos florestais, foram registrados o maior número de estados com localização forte, em razão da grande quantidade de usinas. Em 2000, apenas São Paulo (15,00 MW) e o Rio Grande do Sul (18,00 MW) apresentaram oferta de bioeletricidade dos resíduos, a partir das térmicas Ripasa e Central Termelétrica de Geração do RS, dessa forma o *QL* para os estados foi 33,50 (SP) e 1,23 (RS). O Amazonas foi o estado que apresentou maior localização para este recurso, com *QL* médio foi 5,84 (2001 a 2019); em seguida estiveram: Roraima (5,44, de 2008 a 2019), Acre (5,44, de 2009 a 2019), São Paulo (5,36, de 2000 a 2019) e Mato Grosso (5,29, de 2002 a 2019). A Bahia (0,20, de 2012 a 2019) e o Mato Grosso do Sul (0,26, de 2012 a 2019) foram os únicos a apresentar relevância baixa, devido ao pequeno número de usinas, contraposto a elevada potência outorgada a partir do licor negro.



Legenda: ■ $QL \geq 1,0$ ■ $0,5 \leq QL < 1,0$ ■ $QL < 0,5$

Figura 3.2. Evolução do Quociente Locacional (QL) nos Estados brasileiros para potência outorgada da biomassa florestal (nível 2), para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A geração a partir do gás de alto forno encontra relação com as indústrias metalúrgicas e siderúrgicas (SANTOS JÚNIOR, 2019). Nesse contexto, Minas Gerais apresentou os maiores valores de QL , com média de 7,58 (2002-2019) e valor máximo de 9,84, em 2013. Os estudos de Andrade e Cunha (2003) e Santos e Diniz (2013) apontaram o setor siderúrgico mineiro como o mais dinâmico do Brasil e um dos mais competitivos

do mundo. Outro destaque foi o Mato Grosso do Sul, mesmo com um baixo número de usinas apresentou QL médio de 5,32, em razão da elevada participação entre 2005 e 2007.

Para a lenha, apenas na porção Centro-Sul apresentou relevância para a oferta o que está associado com plantios das florestas plantadas. Entre 2002 e 2008, o estado de Santa Catarina apresentou a única termelétrica para lenha, no Brasil, a usina Chapecó, com 4,00 MW outorgados; como resultado o QL médio da unidade federativa foi 10,63 (2002–2008). A partir de 2009, com a outorga da Caramuru Itaperi, no Goiás, houve uma queda no valor de QL (4,85, de 2009 a 2015) do estado catarinense. Novas entradas foram registradas em 2016 (Citrus - SP), 2017 (Alga Agro - MG), 2018 (Orsa – SP, Caramuru Itaperi – GO e Marfrig São Gabriel - RS) e 2019 (Impasa - MT). O Goiás, com média de $QL = 209,37$ (2009 a 2019), foi o estado com maior relevância para a bioeletricidade da lenha. Também constituíram o ranking: MT (15,80, em 2019), SC (7,10, de 2002 a 2019), SP (6,99, de 2016 a 2019) e MG (2,52, de 2017 a 2019). O Rio Grande do Sul foi o único estado com localização fraca, com QL inferior 0,01, em 2018 e 2019.

Para o carvão vegetal, apenas 4 unidades federativas participaram da oferta: Espírito Santo, Maranhão, Minas Gerais e Rio de Janeiro. O Rio de Janeiro foi o estado com maior (61,63) QL médio (2013 a 2019) e com apenas uma termelétrica de base florestal. O Maranhão e Minas Gerais, ambos com 3 termelétricas de carvão vegetal, indicaram localização elevada; justificada pela existência de polos siderúrgicos e metalúrgicos. Norgate et al. (2012) ressaltaram a importância da cogeração a partir da biomassa florestal nestes setores, com foco na diminuição do impacto ambiental. O QL médio do Maranhão foi 26,42 (2003-2019), com decréscimo a partir de 2012, com a instalação da Suzano Maranhão (termelétrica a licor negro) que dominou grande parte da oferta de bioeletricidade florestal no estado. Para Minas Gerais, o QL médio foi 3,97 (2002-2019) e para o Espírito Santo 0,99 (2014-2019).

Além da localização da potência outorgada da bioeletricidade florestal, também realizou-se uma análise da concentração entre os estados e termelétricas. A Figura 3.3 apresenta a evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada dos estados brasileiros para bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. O $CR(1)$ e $CR(2)$ apontaram a elevada importância dos estados com termelétricas de licor negro na oferta da bioeletricidade florestal (Figura 3.3.a). O valor médio do $CR(1)$ foi 0,2167, enquanto do $CR(2)$ teve média de 0,3847. Dentre os estados destacaram-se Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul, que reversaram o posto da maior oferta durante os anos

analisados. Estiveram instaladas nessas unidades federativas, usinas do grupo Klabin, Aracruz e Suzano.

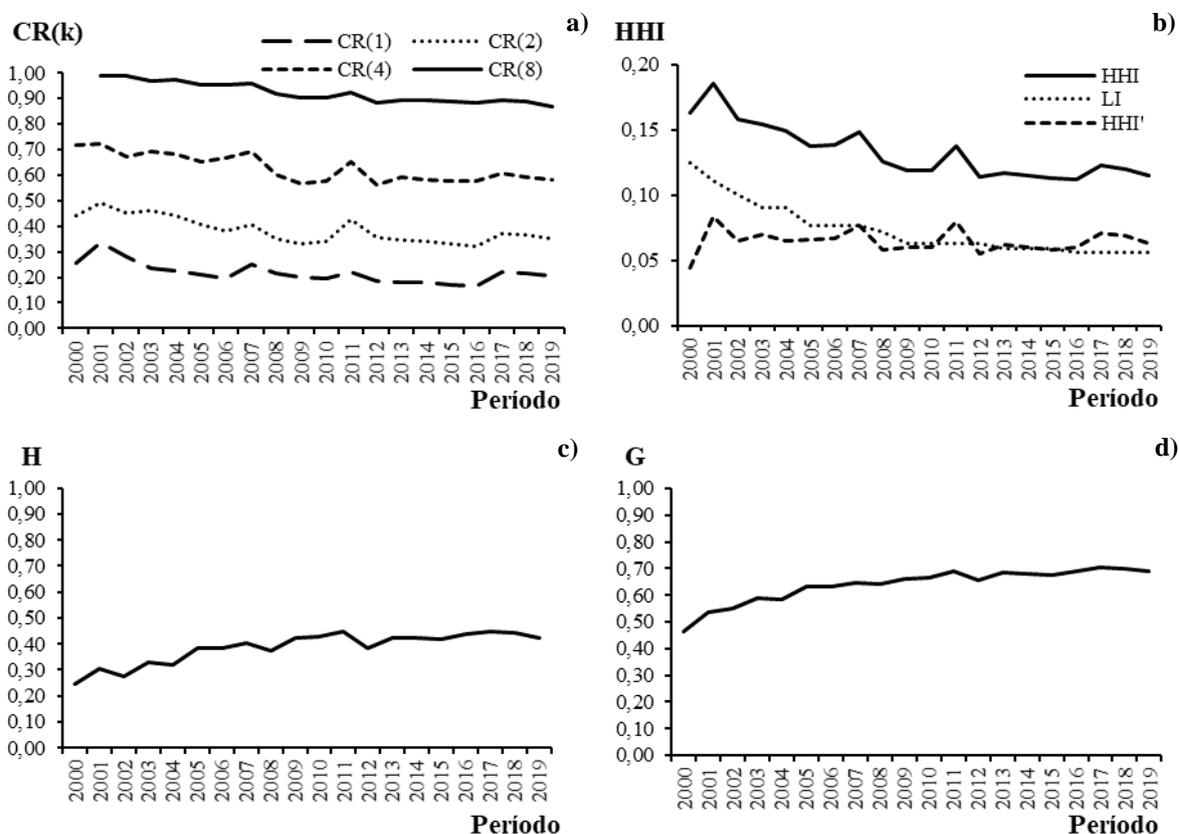


Figura 3.3. Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada dos estados brasileiros para bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O $CR(4)$ apresentou média de 0,6285, que indicou concentração moderadamente alta, entre os estados (BAIN, 1959). Observou tendência de oligopólio, sendo o Paraná, a Bahia, o Espírito Santo e o Mato Grosso do Sul, os estados que dominaram a participação no índice (SCHERER; ROSS, 1990). O maior $CR(4)$ foi 0,7248 (concentração alta), em 2001, e o menor de 0,5767 (concentração moderadamente alta), em 2015. A entrada de pequenas usinas entre os anos de 2010 a 2016 criou um período de queda na concentração, que voltou a crescer a partir de 2017, com a outorga da Fibria MS-II (269,58 MW) e Onça Pintada (50,00 MW), ambas no MS.

O $CR(8)$ apresentou valores altos, dado o baixo número de participantes no mercado. A média do índice foi 0,9219 (2001-2019), com maior registro em 2002 (0,9869)

e menor em 2015 (0,8902). A queda registrada em todos os níveis de $CR(k)$ resultou da melhor distribuição das térmicas a licor negro, com grandes usinas no MS, BA, MA e PR, o aumento do número de usinas de resíduos florestais, com destaque para o Norte, e a elevada densidade energética das termelétricas de gás de alto forno (MG e MS).

Dentre os índices sumários, a Figura 3.3.b mostra que o HHI e LI registraram queda na concentração estadual da oferta de bioeletricidade florestal, devido a entrada de novos participantes; a média do HHI foi 0,1333 e 0,073 para o LI . A maior diferença (0,0749) entre os índices foi registrada em 2011, quando apenas a Bahia e o Mato Grosso do Sul registravam 42,47% da oferta nacional, enquanto a menor diferença foi em 2000 (0,0384), todavia esse foi o ano com maior número de estados participantes. O HHI' médio (0,0646) apontou uma distribuição atomizada (REZENDE, 1994), o ano de menor concentração foi 2000 ($HHI' = 0,0439$) e a maior em 2001 ($HHI' = 0,0838$). A Figura 3.3.c O índice de Hoover (H), Figura 3.2.c, apontou concentração fraca a média apesar de um pequeno aumento do indicador, de $H = 0,2441$ (2000) para $H = 0,4230$ (2019), por sua proximidade de zero (HUANG; LEUNG, 2009). O índice de desigualdade de Gini (Figura 3.3.d), para o período de 2000 a 2019 foi 0,6344 que apontou desigualdade média a forte entre os estados.

A Figura 3.4 apresenta a evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada nas termelétricas da bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. O $CR(1)$ mostrou o comportamento da maior termelétrica nacional, a média do índice foi 0,1605 (Figura 3.4.a). O maior $CR(1)$ foi 0,3372 (2001), com controle da Aracruz – ES (231,88 MW) e a menor esteve com 0,1668 (2016), com a Klabin Celulose (330,00 MW). Compuseram o $CR(1)$: Aracruz (2000 – 2010), Eldorado Celulose (2011), Suzano Mucuri (2012) e Klabin Celulose (2013 – 2019), todas as empresas utilizaram o licor negro para geração de eletricidade. O $CR(2)$ apresentou média de 0,2648 e demonstrou elevada disparidade entre as maiores indústrias do setor. A maior concentração foi 0,4827 (2001), contando com a Aracruz – ES (231,88 MW) e Cenibra – MG (100,00 MW), enquanto a menor teve $CR(2)$ de 0,1695, em 2019; foram participantes a Klabin Celulose (330,00 MW) e a Fibria MS II (269,58 MW). A queda da concentração nos anos finais esteve associada a entrada de participantes na oferta.

Para o $CR(4)$ a média de 0,4362 (2000 – 2019), representou concentração moderadamente baixa. O índice apresentou decréscimo acelerado com média -4,10% a.a., o que foi motivado pela entrada de novas empresas no mercado. A partir de 2008, a

oferta deixou de ter características de oligopólio, estando abaixo de 0,40. O maior valor de $CR(4)$ foi 0,6965 (2000) e o menor de 0,3210 (2018). As principais geradoras estiveram associadas aos grupos Suzano (responsável pelas térmicas Fibria), Klabin e Celulose Irani, Dos Santos et al. (2019) destacou que estes grupos representaram cerca de 85% da participação de mercado da indústria celulose e papel no Brasil.

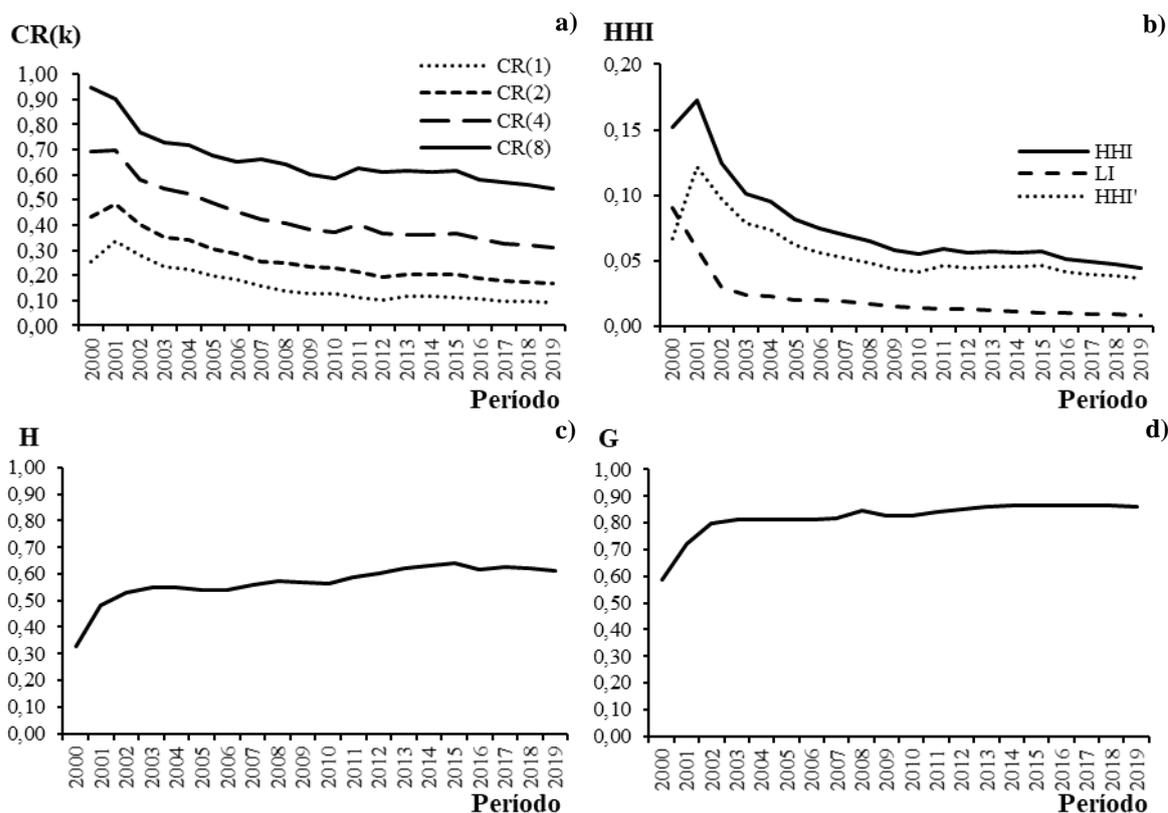


Figura 3.4. Evolução dos indicadores de concentração da potência outorgada nas termelétricas da bioeletricidade florestal, de 2000 a 2019. Razão de Concentração (a), índice Herfindahl-Hirschman (b), índice de Hoover (c) e índice de Gini (d).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O $CR(8)$ médio foi 0,6610, que indicou concentração moderadamente baixa. O valor mais alto foi 0,9460 (2000), composto pelas termelétricas Aracruz, Cenibra, Suzano Mucuri, Jari Celulose, Klabin, CMPC, Klabin Otacílio Costa, Klabin Correia Pinto, todas utilizavam o licor negro como fonte motriz. O menor valor do $CR(8)$ foi 0,5425, para 2019, e indicou concentração moderadamente baixa. Participaram as usinas Klabin Celulose, Fibria MS II, Suzano Maranhão, CMPC, Eldorado Celulose, Suzano Mucuri, Aracruz e Fibria MS, todas à base de licor negro (apenas a Eldorado Celulose também utilizou

resíduos florestais). A análise combinada com o $CR(4)$ e $CR(8)$ inferiu características de um oligopólio com extremidade competitiva.

Assim como nos estados, a Figura 3.4.b mostra que a diferença entre o HHI e o limite inferior para as termelétricas de biomassa florestal registraram diminuição da concentração no setor. O efeito dos novos participantes tornou-o mais relevante, com média de 0,0763 para o HHI e 0,0214 para o LI , para uma concentração baixa. O HHI' médio (0,0563) apontou a um mercado atomizado. O maior HHI' foi 0,1213 (2001) e o menor de 0,0363 (2019) (REZENDE, 1994).

O índice de Hoover (Figura 3.4.c) e de Gini (Figura 3.4.d) apontaram comportamento distinto do HHI , com aumento na concentração durante o período de estudo, o que pode ser compreendido pela participação elevada ao quadrado para o HHI , resultando em menor sensibilidade a entrada de novos participantes no mercado. A média de H foi 0,5675, estimando concentração média a forte. A menor concentração foi registrada em 2000 ($H= 0,3290$) e a maior em 2015 ($H = 0,6384$). O coeficiente de Gini apresentou comportamento similar a medida de Hoover, com média de 0,8215, e classificou a oferta como de desigualdade forte a muito forte.

3.4 CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas conclui-se que a biomassa florestal apresentou crescimento significativo na oferta de eletricidade brasileira passando de 562,90 MW e 11 termelétricas, em 2000, para 3.532,61 MW e 115 termelétricas, em 2019 (13,20% a.a. para quantidade de termelétricas e 10,15% a.a. para potência outorgada). Destacou-se o uso do licor negro, principalmente nos estados da zona centro-sul do país. O quociente locacional destacou alta localização para a oferta a partir do licor negro (Sul, Bahia, Maranhão e Mato Grosso do Sul) e de resíduos florestais, em diversos estados, com destaque para a região Norte. O estado de Minas Gerais foi o principal para a oferta do gás de alto forno.

Para a concentração em nível estadual, os índices $CR(4)$ e $CR(8)$ apontaram pequena diminuição na concentração no período analisado, o que foi motivado pela constante inserção de participantes no mercado. O HHI apontou queda na concentração. Destacaram para a oferta, os estados do Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Contudo, os índices de Hoover e Gini indicaram aumento na desigualdade.

Dentre as firmas observou-se o destaque das termelétricas de licor negro, com a Aracruz e Suzano Mucuri como as principais nos anos iniciais e a Klabin Celulose a partir

de 2013. O ingresso de novas térmicas resultou um cenário de baixa concentração para o $CR(4)$, $CR(8)$ e HHI ; diferentemente dos demais, o índice de Hoover e o Gini indicaram um leve aumento na desigualdade para os anos finais de análise, apontando concentração forte.

Dado o baixo número de participantes, em nível estadual e entre as termelétricas, notou um cenário de queda na concentração. Este estudo possibilitou o entendimento da disponibilidade brasileira de bioeletricidade florestal e de sua organização no mercado, auxiliando tomadas de decisão no planejamento energético nacional e na orientação de políticas públicas, focadas em regiões com vocação para o desenvolvimento da bioeletricidade florestal.

3.5 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 02 nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: fev. 2020.

AN, Y.; WAN, L. Modelling industrial firm relocation with impacts of spatial dependence. **Int. J. Urban Sci.** v. 22, p. 80–103, 2018.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S. **BNDES 50 Anos - Histórias Setoriais: O Setor Siderúrgico**. 2003.

BAIN, J. **Industrial organization**. New York: J. Wiley, 1959. 274 p.

BROUGHEL, A. E. Impact of state policies on generating capacity for production of electricity and combined heat and power from forest biomass in the United States. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1163–1172, 2019.

BUSU, M. A Market Concentration Analysis of the Biomass Sector in Romania. **Resources**, v. 9, n. 6, p. 64, 29 maio 2020.

CHARUMBIRA, M.; SUNDLE, T. Seller Concentration in the Grain Milling Industry. **American Journal of Economics and Business Administration**, v. 2, n. 3, p. 247-252, 2010.

CIARRETA, A.; NASIROV, S.; SILVA, C. The development of market power in the Spanish power generation sector: Perspectives after market liberalization. **Energy Policy**, v. 96, p. 700–710, set. 2016.

COELHO JUNIOR, L. M.; BURGOS, M. C.; SANTOS JUNIOR, E. P.; PINTO, P. A. L. A. Regional Concentration of The Gross Production Value of Firewood in Paraíba. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, p. e20170887, 2019a.

COELHO JUNIOR, L. M.; MEDEIROS, M. G.; SANTOS JUNIOR, E. P.; BORGES, L. A. C.; JOAQUIM, M. S.; SILVA, M. L. Regional concentration of charcoal production in the state of Paraíba, Brazil (1994 - 2016). **Revista Árvore**, v. 43, n. 1, p. e430105, 2019b.

CRAWLEY, A.; BEYNON, M.; MUNDAY, M. Making Location Quotients More Relevant as a Policy Aid in Regional Spatial Analysis. **Urban Studies**, v. 50, n. 9, p. 1854–1869, 20 jul. 2013.

CUENCA, G. M. A.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Rev. Econ. NE**, v. 47, n. 4, p. 91–106, 2016.

DA COSTA, T. P.; QUINTEIRO, P.; TARELHO, L. A.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Environmental impacts of forest biomass-to-energy conversion technologies: Grate furnace vs. fluidised bed furnace. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 153–162, 2018.

DOS SANTOS, D. R.; ROCHA, P. M.; COSTA, V. G.; SOARES, Y. L. S. Economic and Financial Performance of the Brazilian Pulp and Paper Industry. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 7, p. 622 – 634, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Séries Históricas**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FRACARO, G.; VAKKILAINEN, E.; HAMAGUCHI, M.; SOUZA, S. N. M. Energy efficiency in the Brazilian pulp and paper industry. **Energies**, v. 5, n. 9, p. 3550-3572, 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAO Data**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GINI, C. Variabilità e mutabilità (1912). In: PIZETTI, E.; SALVEMINI, T. (Ed.). **Reprinted in memorie di metodologica statistica**. Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; SKOG, K. Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern U.S. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 348–361, 2013.

HANNAH, L.; KAY, J. A. Concentration in Modern Industry: Theory, Measurement and the UK Experience; **Springer**: Berlin/Heidelberg, Germany, 1977.

HIRSCHMAN, A. O. The paternity of an index. **The American Economic Review**, Pittsburgh, v. 54, n. 5, p 761-762, 1964.

HUANG, Y.; LEUNG, Y. Measuring regional inequality: a comparison of coefficient of variation and Hoover concentration index. **The Open Geography Journal**, v. 2, n. 1, p. 25-34, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2018**. [s.l: s.n.]. Brasília: IBÁ, 2018. Disponível em: www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf. Acesso em: 27 de mar. de 2019.

IOANNIDIS, A. CHALVATZIS, K. J.; LI, X.; NOTTON, G.; STEPHANIDES, P. The case for islands' energy vulnerability: Electricity supply diversity in 44 global islands. **Renewable Energy**, v. 143, p. 440–452, dez. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: jul. 2020.

ISARD, W. **Methods of regional analysis**. The M.I.T. Press, Massachusetts, 1960.

KAMIŃSKI, J. The development of market power in the Polish power generation sector: A 10-year perspective. **Energy Policy**, v. 42, p. 136–147, 2012.

MARQUES, M. I. M. Considerações sobre a expansão da indústria de papel e celulose no Brasil a partir do caso da Suzano Papel e Celulose. **GEOgraphia**, v. 17, n. 35, p. 120-147, 2015.

MIRZA, M. Advertising Restrictions and Market Concentration in the Cigarette Industry: A Cross-Country Analysis. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 18, p. 3364, 2019.

MONASTÉRIO, L. Indicadores de análise regional e espacial. *In*: CRUZ, B. O; FURTADO, B. A; MONASTERIO, L; JÚNIOR, W. R. **Economia Regional e Urbana: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.

MULLIGAN, G.F. Equality measures and facility location. **Papers in Regional Science: The Journal of the RSAI**, v.70, n.4, p. 345–65, 1991.

NORGATE, T.; HAQUE, N.; SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. **ISIJ international**, v. 52, n. 8, p. 1472-1481, 2012.

OTSUKA, A. Regional energy demand in Japan: dynamic shift-share analysis. **Energy, Sustainability and Society**, v. 6, n. 1, p. 10, 2016.

PIACENTI, C.; ALVES, L. R.; LIMA, J. F. O Perfil Locacional do Emprego Setorial no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 39, n.3, p. 482-502, jul./set. 2008.

POKHAREL, R.; GRALA, R. K.; GREBNER, D. L. Woody residue utilization for bioenergy by primary forest products manufacturers: An exploratory analysis. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 161-171, 2017.

PORTER, M. E. Location, competition, and economic development: local clusters in a global economy. **Economic Development Quarterly**, v. 14, n. 1, p. 15-34, 2000.

PURWANTO, A.; SUSNIK, J.; SURYADI, F. X.; FRAITURE, C. Determining strategies for water, energy, and food-related sectors in local economic development. **Sustainable Production and Consumption**, v. 16, p. 162–175, 2018.

RESENDE, M. Medidas de concentração industrial: uma resenha. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 12, n. 21, p. 24-33, jul./set. 1994.

SANTOS JÚNIOR, E. P. **Categoria Graduando 1º Lugar**: Concentração e distribuição espacial da oferta brasileira de bioeletricidade florestal. 2019.

SANTOS, U. P.; DINIZ, C. C. A interação universidade-empresa na siderurgia de Minas Gerais. **Nova Economia**, v. 23, n. 2, p. 279-306, 2013.

SCHERER, F. M.; ROSS, D. Industrial market structure and economic performance. 3rd ed. Boston: Houghton Mifflin, 1990. 270 p.

SLEUWAEGEN, L.E.; DEHANDSCHUTTER, W.V. The Herfindahl index and concentration ratios revisited. **Antit. Bull.**, v.34, p. 625-640, 1986.

SIMIONI, F.J., MOREIRA, J.M.M.A.P., FACHINELLO, A.L., BUSCHINELLI, C.C. de A., MATSUURA, M.I.S.F., 2017. Evolution and concentration of the production of firewood and charcoal from forestry in Brazil. **Ciência Florestal** 27, 731–742. <https://doi.org/10.5902/1980509827758>.

SOUZA, N. J. Economia Regional: Conceitos e Fundamentos Teóricos. **Revista Perspectiva Econômica**, Universidade Vale do Rio dos Sinos, Ano XVI, v. 11, nº. 32, p. 67-102, 1981.

THISSE, J. F. Geografia Econômica. *In*: CRUZ, B. O; FURTADO, B. A; MONASTERIO, L; JÚNIOR, W. R. **Economia Regional e Urbana**: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.

TUSHAJ, A. **Market concentration in the banking sector**: Evidence from Albania. BERG Working paper series on government and growth, 2010.

YI, C. An Analysis on the Determinants of the Agglomeration by Industrial Type in Seoul Metropolitan Region with Spatial Econometrics. **Gyeonggi Res. Inst.**, v. 16, n. 14, p. 1–33. 41, 2016.

VON THÜNEN, J. H. Der isolierte staat in beziehung auf landwirtschaft und nationalökonomie. Hamburg: Perthes, 1826. Translation: **The isolated state**. Oxford: Pergammon Press, 1966.

WENG, Q. Local impacts of the post-Mao development strategy: the case of the Zhujiang Delta, southern China. **International Journal of Urban and Regional Research**, v. 22, n. 3, p. 425-442, 1998.

WIKLE, T. A. Geographical patterns of membership in US environmental organizations. **The Professional Geographer**, v.47, n.1, p. 41-48, 1995.

WOLAK, F. A. Measuring the competitiveness benefits of a transmission investment policy: The case of the Alberta electricity market. **Energy policy**, v. 85, p. 426-444, 2015.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources 2016. **World Energy Council 2016**, p. 6–46, 2016.

ZHAO, H.; LIN, B. Will agglomeration improve the energy efficiency in China's textile industry: Evidence and policy implications. **Applied Energy**, v. 237, p. 326–337, mar. 2019.

ZHENG, Q.; LIN, B. Impact of industrial agglomeration on energy efficiency in China's paper industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1072–1080, maio 2018.

4 ARTIGO 3 - POLARIZAÇÃO DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)

RESUMO

A expansão da bioeletricidade florestal é influenciada pela disponibilidade de biomassa. Em busca de orientar bioeconomias regionais, auxiliar na tomada de decisão e políticas públicas do setor elétrico, este trabalho analisou a polarização da bioeletricidade florestal no Brasil, entre 2000 e 2019. Os dados utilizados foram da outorga das termelétricas de biomassa florestal obtidos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os indicadores para mensurar a polarização foram a curva de Lorenz e o índice de Gini (G), juntamente com as medidas de polarização de Foster e Wolfson (P_{FW}) e de Esteban e Ray (P_{ER}). Os principais resultados mostraram que o uso da bioeletricidade florestal brasileira aumentou de 562,90 MW e 11 termelétricas, em 2000, para 3.532,61 MW e 115 termelétricas, em 2019. Para o nível regional observou queda na P_{FW} e P_{ER} , sendo a maior polarização no período de 2002 a 2008, onde destacou a região Sudeste como principal participante. Houve aumento na polarização estadual ($P_{FWmed.} = 0,3002$ e $P_{ER(1,6)med.} = 0,1530$) e entre as termelétricas da biomassa florestal ($P_{FWmed.} = 0,5477$ e $P_{ER(1,6)med.} = 0,1294$), resultado da outorga de grandes usinas do licor negro nos estados do Mato Grosso do Sul e Paraná, a partir de 2013. Para as fontes de nível 2, registrou-se o domínio do licor negro e dos resíduos florestais sobre a oferta nacional, acarretando a existência de polos ($P_{FWmed.} = 0,5349$ e $P_{ER(1,6)med.} = 0,1870$). A polarização se mostrou relevante ao objeto de estudo, sendo sua aplicação inédita para análises energéticas no Brasil.

Palavras-chave: Bioenergia, Biomassa florestal, Bipolarização, Polarização multigrupo.

ARTICLE 3 - POLARIZATION OF FOREST BIOELECTRICITY IN BRAZIL (2000 - 2019)

ABSTRACT

The expansion of forest bioelectricity has an influence on the availability of biomass. In search of guiding regional bioeconomies, assisting in decision making and public policies in the electricity sector. This work analyzed the polarization of forest bioelectricity in Brazil, between 2000 and 2019. The data used were from the granting of forest biomass thermoelectric plants obtained from the National Electric Energy Agency (ANEEL). The indicators to measure the polarization are as follows: the Lorenz curve and the Gini index (G), together with the polarization measures of Foster and Wolfson (P_{FW}) and Esteban and Ray (P_{ER}). The main results showed that the use of Brazilian forest bioelectricity increased from 562.90 MW and 11 thermoelectric plants in 2000 to 3,532.61 MW and 115 thermoelectric plants in 2019. For the regional level, there was a decrease for P_{FW} and P_{ER} , being the greater polarization in the period from 2002 to 2008, where it highlighted the Southeast region as the main player. There was an increase in state polarization ($P_{FW_{avg.}} = 0.3002$ and $P_{ER(1.6)_{avg.}} = 0.1530$) and among the forest biomass thermoelectric plants ($P_{FW_{avg.}} = 0.5477$ and $P_{ER(1.6)_{avg.}} = 0.1294$), as a result of the granting of large black liquor plants in the states of Mato Grosso do Sul and Paraná, as of 2013. For level 2 sources, the domain of black liquor and forest residues was registered over the national supply, leading to the existence of hubs ($P_{FW_{avg.}} = 0.5349$ and $P_{ER(1.6)_{avg.}} = 0.1870$). The polarization proved to be relevant to the object of study, being its unprecedented application for energy analysis in Brazil.

Keywords: Bioenergy, Forest biomass, Bipolarization, Multigroup polarization.

4.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial, associada às emissões de gases de efeito estufa e o esgotamento das reservas fósseis, vem despertando o interesse por alternativas energéticas, como a bioenergia. Os recursos de biomassa advêm, principalmente, da agropecuária, das florestas e dos resíduos urbanos. A biomassa florestal pode ser utilizada como combustível residencial (cocção e aquecimento) e industrial por meio de geração combinada (calor e eletricidade), tornando-a um componente acessível às energias renováveis (LUNDMARK; ATHANASSIADIS; WETTERLUND, 2015).

O Brasil é uma nação com vocação florestal, possuindo vantagens comparativas e competitivas. Em 2018, a produção mundial de madeira para fins energéticos foi de 1,542 bilhões m³ e os principais países produtores são a Índia (303,34 milhões de m³), a China (163,01 milhões de m³) e o Brasil (123,44 milhões de m³). No Brasil, a produção florestal advém, principalmente, da silvicultura com uma área de florestas plantadas de 7,83 milhões de hectares ($\times 10^6$ ha), com destaque para o eucalipto, com $5,7 \times 10^6$ ha (72,80%) e o pinus, com $1,6 \times 10^6$ ha (20,43%) (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2020; INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2019).

Os subprodutos industriais florestais são utilizados para geração de calor de processo e, ou, para a cogeração. Em 2018, a indústria de papel e celulose brasileira utilizou 64% da demanda elétrica suprida pelo licor negro, 18% com biomassa residual florestal, 13% como gás natural, 3% com óleo combustível e 2% com outras fontes (IBÁ, 2019; SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS- SNIF, 2020). A oferta outorgada de bioeletricidade brasileira concentra-se nos resíduos sucoenergéticos e nas florestas. Em 2019, a capacidade disponível a partir da biomassa foi 14,97 GW (Giga Watts) (8,60% do potencial nacional), destes 11,54 GW (77,08%) foram obtidos da biomassa agroindustrial, 3,24 GW (2,16%) da florestal e 0,19 GW (1,27%) dos biocombustíveis líquidos, resíduos urbanos e animais. Para a biomassa florestal estiveram o licor negro (2,53 GW), os resíduos florestais (0,45 GW), o gás de alto forno da biomassa (0,13 GW), o carvão vegetal (0,05 GW) e a lenha (0,08 GW) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA DE ELÉTRICA - ANEEL, 2020).

Sacirovic, Ketin e Vignjevic (2019) ressaltaram que diferentes regiões podem fornecer condições favoráveis para o desenvolvimento de atividades econômicas. Para a

bioeletricidade florestal, observam as restrições espaciais, que impactam sobre a disponibilidade de recurso e custos associados a produção madeireira e seu transporte; (HERNÁNDEZ; JAEGER; SAMPERIO, 2018).

Segundo Duro (2015) a análise de polarização auxilia o entendimento de conflitos e discrepâncias entre regiões e/ou empresas de um segmento, sendo uma ferramenta importante para avaliar a distribuição espacial e de mercado. Para Duro e Padilla (2013), polarização é um grau de agrupamento em polos homogêneos dentro de uma distribuição, distantes um do outro, sendo que uma distribuição altamente polarizada é aquela onde há poucos polos com grande número de participantes e alto grau de oposição entre grupos. Esteban e Ray (1994) diferem esse conceito da desigualdade, na medida que os índices de desigualdade medem apenas o grau de dispersão das observações, enquanto a polarização é capaz de inferir o grau de adversidade entre grupos desta distribuição. A diminuição da desigualdade não implica, necessariamente, em uma queda da polarização, tendo em vista que a distribuição pode ter formado grupos com maior homogeneidade em polos distintos.

Alguns ensaios realizados com base nas medidas de polarização foram Molnar (2011) para avaliação econômica na Romênia, D'Ambrosio (2001) para a distribuição de renda na Itália, Li et al. (2019) na análise de crimes na China, Ezcurra (2009) na polarização de renda dos Estados Unidos, Duro e Padilla (2013) para emissões de gases de efeito estufa nos países da União Europeia (EU) e Duro (2015) para intensidade energética na EU. Para compreender a distribuição espacial e investigar a existência de polos geográficos e entre firmas, e auxiliar a tomada de decisão e políticas públicas do setor energético, este trabalho analisou a polarização da bioeletricidade florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Objeto de estudo

As termelétricas de biomassa florestal estão disponíveis nos Sistema de Informações da Aneel (SIGA) da ANEEL, no período de 2000 a 2019. As usinas estão classificadas em nível 1 (biomassa florestal) e nível 2 (lenha, carvão vegetal, gás de alto forno, licor negro e resíduos florestais). As informações das outorgas dessas térmicas foram obtidas da biblioteca digital (Sophia) da ANEEL.

Realizou-se uma análise de conjuntura da quantidade de termelétricas e da potência outorgada (MW) nas regiões e estados brasileiros, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Utilizou a Taxa de crescimento geométrica (TGC), Equação 1, para observar as alterações (aumento e diminuição) na potência outorgada entre 2000 e 2019 (CUENCA; DOMPIERI, 2016).

$$TGC[\%] = \left[\sqrt{\frac{V_F}{V_0}} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

em que, V_F = quantidade ou potência outorgada (MW) da biomassa florestal no ano final; V_0 = quantidade ou potência do ano inicial; Δt = variação temporal (expressa em anos).

4.2.2 Curva de Lorenz e o Coeficiente de Gini

A curva de Lorenz, Figura 4.1, idealizada por Max Otto Lorenz (1905), trata-se da forma gráfica utilizada para representação de uma distribuição de desigualdade. Apresenta em sua abcissa (eixo X) a participação acumulada das termelétricas ou estados brasileiros com oferta de bioeletricidade florestal, enquanto o eixo das ordenadas (eixo Y) representa a participação da potência outorgada (MEDEIROS, 2012).

O comportamento da curva de Lorenz varia de desigualdade completa (potência outorgada centrada em um único participante) até uma distribuição perfeita (potência outorgada igual para os participantes), neste ponto, a "curva" de Lorenz seria o segmento de reta OB na Figura 4.1, ou seja, linha da perfeita igualdade. A representação gráfica auxilia a determinação das medidas de polarização, com base no cálculo do índice de Gini e na discrepância da amostra.

O Índice de Gini (G), proposto por Gini (1912), na sua origem foi utilizado para análises de desigualdade social, com base na renda populacional e encontra-se relacionado a curva de Lorenz. De acordo com Medina (2001) o índice de Gini compara a distribuição da potência outorgada (termelétricas ou estados) com a linha de perfeita igualdade, sendo o quociente entre a área de desigualdade (A) e a área formada pelos vértices OBC (0,5), Equação 2.

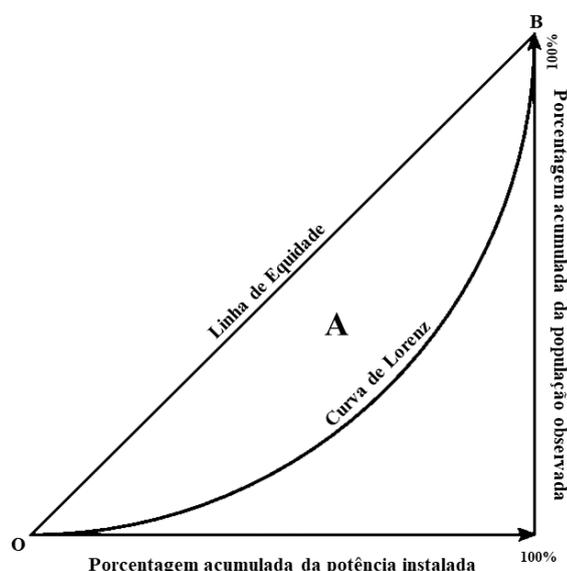


Figura 4.1. Curva de Lorenz

Fonte: Adaptado de Coulter (2019).

$$G = \frac{A}{0,5} \quad (2)$$

Além da mensuração pela curva de Lorenz, a desigualdade de Gini também pode ser calculada de forma algébrica, atingindo um maior rigor matemático. Neste trabalho foi utilizada a formulação, Equação 3, apresentada para o Stata SE/15.

$$G(Y) = -2Cov\left(\frac{Y}{\mu(Y)}, (1 - F(Y))\right) \quad (3)$$

em que, Y = potência outorgada (para regiões, estados, termelétricas ou fontes de nível 2), $\mu(Y)$ = média da potência outorgada e $F(Y)$ = a distribuição acumulativa da potência outorgada (Y) (LERMAN, 1984; VAN KERM, 2009).

O G pode ser classificado como de desigualdade nula a fraca ($0,00 \leq G \leq 0,25$), desigualdade fraca a média ($0,25 < G \leq 0,50$), desigualdade média a forte ($0,50 < G \leq 0,70$), desigualdade forte a muito forte ($0,70 < G \leq 0,90$) e desigualdade muito forte a absoluta ($0,90 < G \leq 1,00$) (GINI, 1912).

4.2.3 Medidas de polarização

De acordo com Wang, Caminada e Wang (2017) as medidas de polarização podem ser classificadas em dois grupos principais: bipolarização e polarização multigrupo. A bipolarização descreve o processo no qual a classe média diminui enquanto os aglomerados se movem para os dois polos opostos, sendo a principal medida a polarização de Foster e Wolfson (FOSTER; WOLFSON, 2010). Os indicadores multigrupo buscam expressar a formação de polarização em grupos arbitrários, sendo o principal modelo apresentado por Esteban e Ray (1994).

Polarização de Foster e Wolfson (P_{FW})

A bipolarização de Foster e Wolfson (2010) trata-se de uma das principais formulações para o desenvolvimento das medidas de polarização, o índice de Foster e Wolfson pode ser modelado a partir da mediana como sua separatriz (Equação 4).

$$P = 4 \frac{\mu(Y)}{m(Y)} \left(\frac{1}{2} - L(0,5) - \frac{G}{2} \right) \quad (4)$$

em que, $\mu(Y)$ = a média da potência outorgada de bioeletricidade florestal (regiões, termelétricas ou fontes nível 2); $m(Y)$ = a mediana da distribuição de potência outorgada de bioeletricidade florestal (regiões, termelétricas ou fontes nível 2); $L(0,5)$ = o valor acumulado da curva de Lorenz para a mediana da distribuição e G = o índice de Gini de toda a distribuição.

Para um melhor ajuste da polarização, Foster e Wolfson (2010) afirmaram que se os grupos são definidos por faixas não sobrepostas, pode decompor o índice de Gini em dois componentes, $G = G^B + G^W$. Onde, G^B = o índice de Gini entre os grupos, separados pela mediana [$L(0,5)$] e G^W = o coeficiente no interior dos grupos. Os índices de Gini (G^W e G^B) podem ser calculados pelas Equações 5 e 6, respectivamente. A bipolarização de Foster e Wolfson, P_{FW} , é apresentada na Equação 7. Ambas medidas de polarização variam entre 0 (zero) e 1 (um), sendo valores próximos a 1 a máxima polarização.

$$G^W = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu(Y_B)}{\mu(Y)} G(Y_B) + \frac{\mu(Y_R)}{\mu(Y)} G(Y_R) \right) \quad (5)$$

$$G^B = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu(Y_R)}{\mu(Y)} - \frac{\mu(Y_P)}{\mu(Y)} \right) \quad (6)$$

em que, $\mu(Y_B)$ = a potência média entre as regiões, termelétricas ou fontes nível 2 do grupo de baixa e $\mu(Y_A)$ = a potência média entre as regiões, termelétricas ou fontes nível 2 do grupo de alta, $G(Y_B)$ o coeficiente de Gini entre o grupo de baixa oferta, $G(Y_A)$ o coeficiente de Gini entre o grupo de alta e $G(Y)$ é o Gini geral.

$$P_{FW} = (G^B - G^W) \frac{\mu(Y)}{m(Y)} \quad (7)$$

Polarização de Esteban e Ray

Esteban e Ray (1994) apresentaram o conceito de polarização em grupos (Equação 8), atribuindo uma relação do grau de identificação entre participantes de um mesmo nível de renda e uma alienação aos demais grupos distintos.

$$P_{ER} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \pi_i^{1+\alpha} \pi_j |\mu_i - \mu_j| \quad (8)$$

em que, α = parâmetro de sensibilidade, $0 \leq \alpha \leq 1,6$, sendo $\alpha = 1,6$, resultado de alta homogeneidade intra grupo, n = o número de níveis de potência da biomassa florestal, $\pi_i^{1+\alpha}$ = parcela de identificação (ID) intra grupo, e $|\mu_i - \mu_j|$ = parcela de alienação intergrupo (WANG; CAMINADA; WANG, 2017).

Deve-se registrar que a P_{ER} foi avaliada com amplitude de 0,05 no logaritmo do rendimento real. Calculou-se o índice para os parâmetros de sensibilidade (α)= 1,00, 1,30 e 1,60. A formação de grupos ocorreu de forma exógena: foram utilizados os quartis de potência outorgada, tomando grupos de potência baixa (Q1), média (Q2), alta (Q3) e muito alta (Q4); este ajuste foi utilizado para análise de polarização por estados e por termelétricas. Para evitar inúmeros grupos, foram utilizados agrupamentos para os quartis de potência outorgada. Para todos os estados ou termelétricas pertencentes ao mesmo quartil foi utilizado o valor médio do intervalo.

Estabeleceu-se níveis de oferta baixa (Quartil um – Q1), média (Quartil dois – Q2), alta (Quartil três – Q3) e muito alta (Quartil quatro – Q4). Os quartis foram categorizados pela primeira quarta parte da potência outorgada (MW), o Q1 ($0 < Q1 \leq 25\%$), segunda quarta parte, o Q2 ($25\% < Q2 \leq 50\%$), terceira quarta parte, o Q3 ($50\% < Q3 \leq 75\%$) e quarta parte final, o Q4 ($75\% < Q4 \leq 100\%$) (DAWSON, 2011).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4.1 apresenta a evolução das termelétricas de base florestal potencial outorgado (Mega Watts - MW), nas regiões e estados brasileiros, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Em 2000, registrou 11 termelétricas da bioeletricidade florestal instaladas, distribuídas nas regiões: Sul (45,45%), Sudeste (27,27%), Nordeste (18,18%) e Norte (9,09%).

Tabela 4.1. Evolução da distribuição regional e estadual das termelétricas de base florestal potencial outorgado (Mega Watts - MW), no Brasil, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019.

	2000		2005		2010		2015		2019	
	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde	Pot	Qde
Sul	144,40	5	272,75	22	425,96	26	955,49	28	1.061,51	35
Paraná	48,85	1	96,85	8	180,58	10	513,98	11	513,98	11
Rio Grande do Sul	48,80	2	58,80	3	69,76	3	262,79	3	354,51	9
Santa Catarina	46,75	2	117,10	11	175,62	13	178,72	14	193,02	15
Centro-Oeste	-	-	8,02	3	208,84	8	477,94	14	859,12	20
Goiás	-	-	-	-	5,00	1	5,00	1	18,20	3
Mato Grosso	-	-	4,52	2	11,80	4	48,90	8	109,20	10
Mato Grosso do Sul	-	-	3,50	1	192,04	3	424,04	5	731,72	7
Nordeste	105,60	2	229,85	4	352,40	6	746,11	8	743,96	9
Bahia	105,60	2	222,65	3	327,20	3	466,07	4	456,52	4
Maranhão	-	-	7,20	1	25,20	3	280,04	4	287,44	5
Sudeste	257,90	3	462,46	15	584,80	21	633,92	28	647,42	31
Espírito Santo	142,90	1	210,40	1	210,40	1	213,90	2	213,90	2
Minas Gerais	100,00	1	144,22	8	249,19	14	316,98	19	314,23	20
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-	2,70	1	2,70	1
São Paulo	15,00	1	107,84	6	125,22	6	100,34	6	116,59	8
Norte	55,00	1	92,58	6	118,94	10	170,61	15	220,61	20
Acre	-	-	-	-	1,50	1	30,47	2	30,47	2
Amazonas	-	-	17,03	3	17,03	3	17,03	3	17,03	3
Pará	55,00	1	55,55	2	55,61	3	78,31	7	78,31	7
Rondônia	-	-	20,00	1	24,00	1	24,00	1	24,00	1
Roraima	-	-	-	-	20,80	2	20,80	2	59,30	6
Tocantins	-	-	-	-	-	-	-	-	11,50	1
BRASIL	562,90	11	1.065,65	50	1.690,93	71	2.984,07	93	3.532,61	115

Fonte: ANEEL, 2020.

Em termos de potência outorgada foram 562,90 MW, a região o Sudeste contribuiu 45,82%, seguido do Sul (25,65%), Nordeste (18,76%) e Norte (9,77%). Dos estados da

federação os principais foram: o Espírito Santo com 25,38% (Aracruz Celulose – ES), a Bahia com 18,76% (Suzano Mucuri - BA) e Minas Gerais com 17,76% (Cenibra – MG), com suas respectivas firmas.

Entre 2000 e 2005, a TGC foi de 17,30% a.a. para capacidade e de 46,01% a.a. para quantidade de empresas e registrou mais cinco estados (MT, MS, MA, AM e RO) na oferta de bioeletricidade florestal. Em 2005, a potência outorgada foi 1.065,65 MW, com 50 termelétricas. A região Sudeste (43,40%) continuou como a principal para oferta e o Sul para quantidade de empreendimentos (44,00%). Dentre os estados, destacou-se para potência, a Bahia (20,89%) e o Espírito Santo (19,74%) e para a quantidade: Santa Catarina (24,00%) e Minas Gerais (16,00%). As principais entradas de firmas foram a Veracel – BA (117,05 MW), Lages – SC (28,00 MW) e Lwarcel – SC (25,70 MW), além da expansão da Aracruz – ES (para 231,88MW) e Ripasa – SP (para 49,63 MW).

No intervalo 2005-2010, a outorga para a bioeletricidade florestal apresentou crescimento de 12,23% a.a. da potência e de 9,16% a.a. para quantidade de empresas, chegando a 1.690,93 MW e 71 usinas. Em 2010, o potencial outorgado distribui nas regiões: Sul (25,19), Sudeste (34,58%), Nordeste (20,84%), Centro-Oeste (12,35%) e Norte (7,03%); e para a quantidade de termelétricas, o ranking foi: Sul (36,62%), Sudeste (29,58%), Norte (14,08%), Centro-Oeste (11,27%) e Nordeste (8,45%). O maior crescimento regional foi do Centro-Oeste, passando de 8,02 MW (2005) para 208,84 MW (2010), com aumento de 125,89% a.a. Dentre os estados, para potência, notabilizou: Bahia (19,35%), Minas Gerais (14,74%) e Espírito Santo (12,44%). Das termelétricas destacou a outorga da VCP – MS (atual Fibria-MS), com 175,10 MW, em 2008.

O período de 2010 a 2015 apresentou aumento na potência outorgada de 15,26% a.a., com crescimento nas regiões Sul (22,38% a.a.), Nordeste (20,62% a.a.) e Centro–Oeste (2,99% a.a.). Em 2015, entre os estados, o Paraná ocupou o a primeira posição, com 17,22% da oferta nacional (MW); para a quantidade de usinas, sobressaiu o estado de Minas Gerais, com 19 termelétricas (26,76%). As principais outorgas foram a da Klabin Celulose – PR (330,00 MW), Suzano Maranhão – MA (254,84 MW) e a Eldorado Celulose – MS (226,00 MW).

Entre 2015 e 2019, foram outorgados 548,64 MW, em 21 novas termelétricas. A região Centro–Oeste continuou com o maior crescimento (15,79% a.a. na potência e 9,32% a.a. na quantidade). O Nordeste foi a única região com decréscimo, ocasionado pela diminuição de potência instalada na termelétrica Viena, em Açailândia – MA. O ranking

da potência instalada entre as regiões foi: Sul (30,05%), Centro-Oeste (24,32%), Nordeste (21,06%), Sudeste (18,33%) e Norte (6,24%). Dos estados, destacou-se para a potência instalada, o Mato Grosso do Sul (20,71%), a instalação da Fibria MS II e outorga da Onça Pintada, somando 319,58 MW neste estado.

A Figura 4.2 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

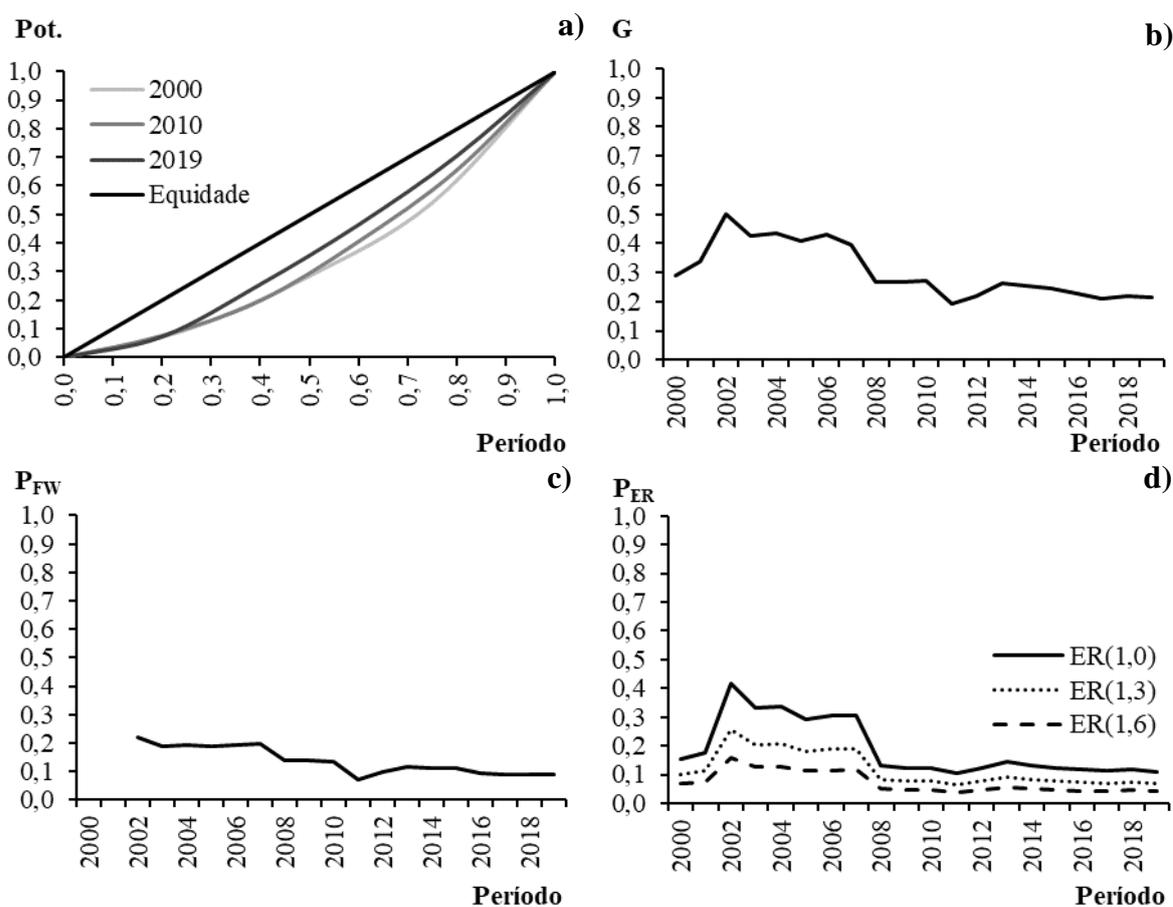


Figura 4.2. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A curva de Lorenz, Figura 4.2.a, permite inferir uma queda na desigualdade entre as regiões. Em 2000, quando apenas quatro regiões participavam da oferta, apenas o Sudeste foi responsável por 55,82% da oferta, enquanto as outras 3 regiões (75% da distribuição) eram responsáveis por 54,18% da potência outorgada. A partir de 2010, com

5 participantes, a disparidade apresentou diminuição. As regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, apresentavam 40,22% da potência outorgada, sendo os outros 59,78% fornecidos pelo Sul e Sudeste. Em 2019, apresentou a maior proximidade da linha de equidade; as regiões com menor participação apresentaram elevado aumento da oferta, com destaque para o Centro-Oeste que teve potência quatro vezes superior à apresentada em 2010. O Sudeste apresentou pouco aumento e a região Sul tornou-se o principal polo nacional.

Embora a desigualdade não seja o foco deste estudo, o índice de Gini, Figura 4.2.b, auxilia no entendimento da polarização no setor de bioeletricidade florestal. O índice teve média de 0,3034, o que indicou desigualdade fraca a média. O período entre 2000 e 2007 apresentou a maior desigualdade, tendo em vista o elevado domínio da região Sudeste sobre a oferta; a partir de 2008, com o aumento da disponibilidade na região Centro-Oeste a desigualdade teve queda. O maior G foi 0,50, em 2002, justificado pela entrada do Centro-Oeste, com apenas 1,20 MW outorgado e pelo aumento de 91,75 MW na capacidade outorgada do Sudeste, entre 2001 e 2002. A menor desigualdade ocorreu em 2017, $G = 0,2080$, onde a principal região, o Sul, apresentou participação de 28,95% (977,79 MW), evidenciando distribuição mais igualitária.

A Figura 4.2.c representa a bipolarização de Foster e Wolfson. Observou-se queda na polarização entre as regiões, considerando a existência de um grupo de alta potência e um de baixa, todavia não houve polarização alta. Para 2000 e 2001 os resultados foram inconsistentes dado o número de participantes. Entre 2002 e 2006, a bipolarização apresentou os maiores valores para a série, devido ao incremento de potência nas regiões Sul e Sudeste e estagnação, principalmente, no Norte do país, além da entrada do Centro-Oeste, com potência outorgada muito baixa. A construção de novas usinas entre 2007, 2008 e 2017 resultou em breve queda para a bipolarização. A P_{FW} apresentou média de 0,1345 (2002 a 2019), sendo a maior polarização registrada em 2013 ($P_{FW} = 0,1366$), ocasionada por forte aumento de potência outorgada no Sul do país. O menor registro foi em 2011 ($P_{FW} = 0,069$), ano em que houve aumento na capacidade outorgada nas regiões, exceto no Norte [Sudeste (587,00 MW - 28,75%), Nordeste (474,48 MW - 23,24%), Centro-Oeste (434,84 MW - 21,29%), Sul (425,96 MW - 20,86%) e Norte (119,74 MW - 5,86%)].

A Figura 4.2.d apresenta a polarização de Esteban e Ray para a potência outorgada da bioeletricidade florestal, entre regiões brasileira, de 2000 a 2019. Observou-se um comportamento semelhante ao obtido pela medida de Foster e Wolfson, todavia com

valores elevados de polarização entre os anos de 2002 e 2008, resultante do domínio da região Sudeste sobre a oferta de bioeletricidade nacional. Outro destaque diz respeito ao fator de sensibilidade (α), para a análise regional, cada observação foi tratada como um grupo específico, portanto, o segmento ER(1,6), que sugere alta coesão intra-grupo, pode ser indicado como o mais representativo (WANG; CAMINADA; WANG, 2017). A média da P_{ER} (1,6) foi 0,0730 (2000 a 2019), a maior polarização ocorreu em 2002 ($P_{ER} = 0,1584$), ano que entrou a região Centro-Oeste e teve aumento de potência para o Sudeste. Assim como para a P_{FW} , o menor valor da P_{ER} foi 0,0400, em 2011.

A Figura 4.3 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros, de 2000 a 2019. Da curva de Lorenz, Figura 4.3.a, foi possível notar aumento da desigualdade entre os estados. Em 2000, os 3 maiores estados (37,50%) (ES, BA e MG), representaram 61,91% (348,50 MW) do potencial outorgado no país. Para 2010, a distribuição tornou ainda mais concentrada para as unidades com maior disponibilidade, os últimos 25% da distribuição (BA, MG, ES e MS), representaram 68,56% (978,82 MW) da potência outorgada. Em 2019, notou aumento ainda mais significativo para a extremidade de maior recurso, 57,41% (2.041,73 MW) da capacidade nacional esteve associada aos 22,22% estados mais importantes (MS, PR, BA e RS).

O índice de Gini, Figura 4.3.b, teve média de 0,4846 e apresentou classificação de desigualdade fraca a média, com aumento do índice no período de estudo; isto evidenciou que o agrupamento em grandes regiões pode proporcionar uma falsa inferência quanto a desigualdade espacial da oferta brasileira de bioeletricidade florestal. Em 2017, registrou o maior valor para o Gini ($G = 0,5600$), associado ao aumento de potência outorgada no estado do Mato Grosso do Sul, que cresceu de 192,04 MW (2010) para 418,04 MW (2011). A menor desigualdade ocorreu em 2000 ($G = 0,3000$), sendo apenas 8 estados participantes. A avaliação da bipolarização de Foster e Wolfson entre os estados brasileiros, Figura 4.3.c, inferiu aumento da polarização. Nos anos iniciais a bipolarização apresentou valores baixos; entre 2000 e 2004, a P_{FW} teve média de 0,1454, resultado do baixo número de unidades federativas participantes. A partir de 2004, a inserção de novos recursos como a lenha, carvão vegetal e GAF em estados com baixa capacidade outorgada, ocasionou aumento ao índice.

O aumento a partir de 2008 foi ocasionado pela elevada potência nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e Bahia. Entre os anos de 2010 e 2012 houve nova diminuição

para a bipolarização, ocasionada pelo aumento da participação dos estados do Mato Grosso do Sul e Maranhão na oferta nacional. A partir de 2013, a outorga de grandes usinas do licor negro resultou no segundo grande aumento da polarização no período estudado. A bipolarização apresentou média de 0,3002 (2000 a 2019), com maior registro em 2011 ($P_{FW} = 0,4550$) e o menor em 2000 ($P_{FW} = 0,078$).

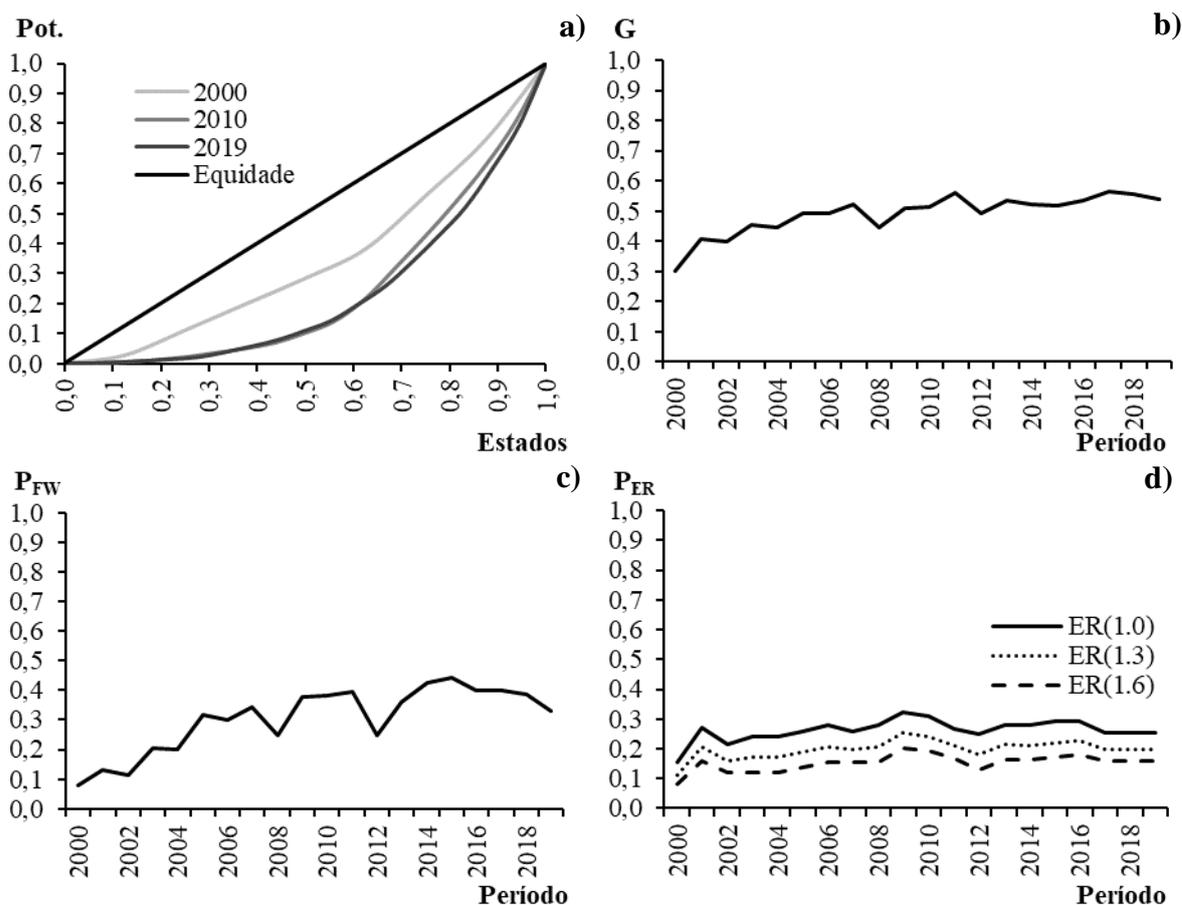


Figura 4.3. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A Figura 4.3.d apresenta a medida de polarização de Esteban e Ray para a oferta de bioeletricidade florestal entre os estados brasileiros, de 2000 a 2019. Entre os estados, a P_{ER} apresentou comportamento semelhante ao índice de Gini, embora desigualdade e polarização não estejam diretamente correlacionadas. Ao mesmo exposto pela bipolarização, a P_{ER} apresentou os menores valores nos anos iniciais (2000 a 2002). O fator de sensibilidade $\alpha = 1,6$ apresentou a menor média ($P_{ER} = 0,1530$) e menor desvio padrão

($P_{ER} = 0,0260$), os fatores que impactaram nas variações da medida foram os mesmos apontados para a P_{FW} . Além da análise espacial, a avaliação da polarização na oferta brasileira de bioeletricidade florestal, foi realizada para as termelétricas nacionais, conforme apresentado na Figura 4.4.

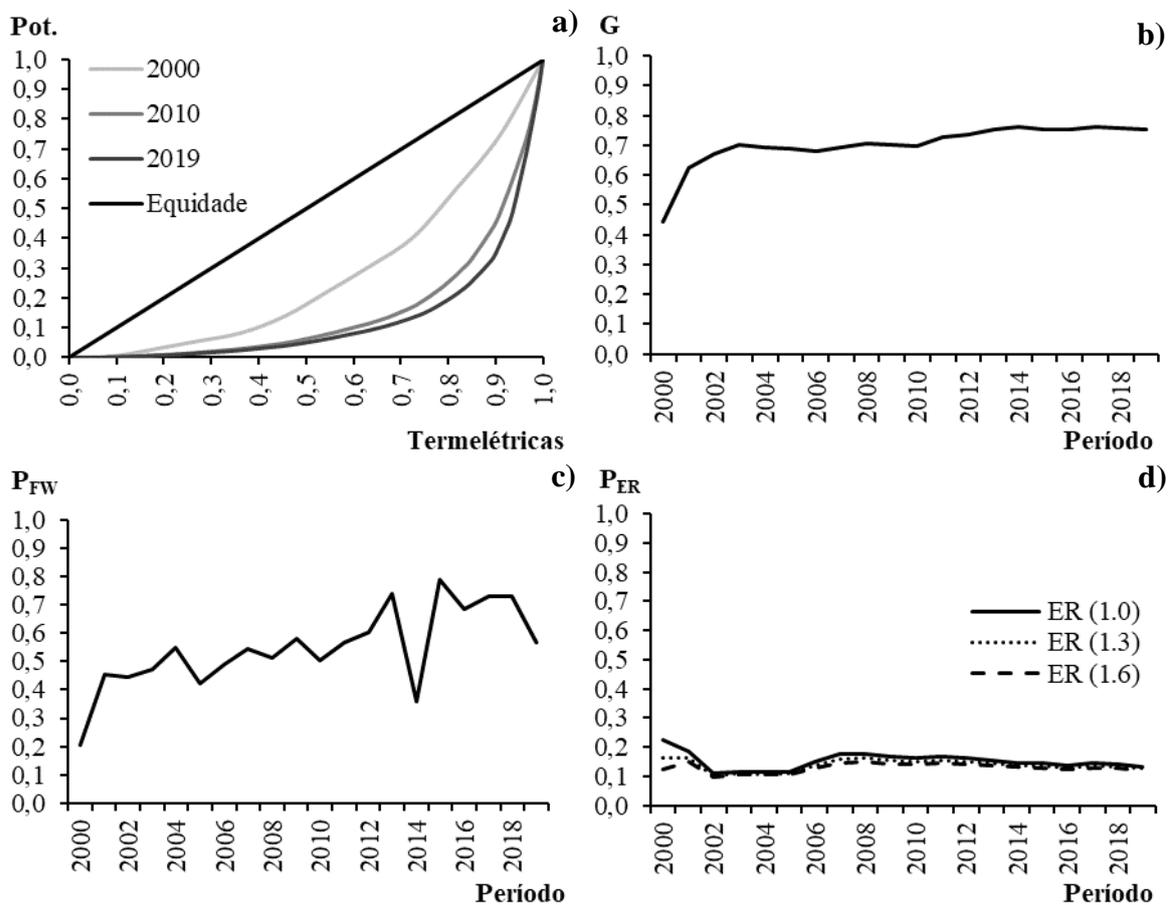


Figura 4.4. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas termelétricas brasileiras, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A curva de Lorenz (Figura 4.4.a) demonstrou aumento no controle da oferta de bioeletricidade, no período estudado, por parte das térmicas com maior capacidade outorgada. A partir do ano 2000, já houve elevado domínio sobre a oferta de bioeletricidade, com 59,49% da potência outorgada pertencentes a 27,27% das termelétricas (Aracruz, Cenibra e Suzano Mucuri). Em 2010, houve aumento do domínio da potência para as maiores usinas, a primeira metade das térmicas nacionais (50,07%) detiveram apenas 6,51% da potência outorgada (107,68 MW), enquanto as últimas 9,86%

termelétricas da distribuição apresentaram 54,76% da capacidade (925,95 MW). Para 2019, o término da distribuição, notou comportamento semelhante a 2010; as últimas 9,48% das termelétricas da distribuição (Klabin Celulose, Fibria MS II, Suzano Maranhão, CMPC, Eldorado Celulose, Suzano Mucuri, Aracruz, Fibria MS, Veracel, Klabin e Bahia Pulp) apresentaram 63,92% da capacidade (2.257,99 MW).

O índice de Gini (Figura 4.4.b) apresentou crescimento para o período estudado, com destaque para o intervalo 2000 a 2002, com a entrada de 22 novas termelétricas, que resultou em aumento da desigualdade. A média do índice de Gini foi 0,7029, que segundo Gini (1912) caracteriza desigualdade forte a muito forte. Concordante com a curva de Lorenz e com o índice de Gini, a P_{FW} apresentou valores elevados da bipolarização entre as termelétricas, destacando um polo de potência muito alta (>100 MW) e um de baixa.

A P_{FW} (Figura 4.4.c) apresentou aumento significativo após o ano 2000, como apontado pelo G . A média para a P_{FW} foi de 0,5477, com valor máximo de 0,790, em 2015, e mínimo de 0,207, em 2000. A entrada de novas empresas elevou a desigualdade e, neste caso, resultou em aumento da polarização. Outro ponto de destaque foi a queda da polarização ocorrida em 2014, o que pode ser creditado a retirada da usina PIE – RP (30,00 MW). O aumento da polarização entre as termelétricas na última década de análise ocorreu da elevada densidade energética das termelétricas do licor negro. Darmawan et al. (2017) constataram o grande potencial desse recurso para cogeração de eletricidade. Os autores afirmaram que uma fábrica do setor de celulose e papel gera 1,7-1,8 t-LN / t-celulose (teor em seco), o que resulta em potencial médio de 250 a 500 MW de capacidade. A recuperação de energia do licor negro é suficiente para auto produção de eletricidade e vapor, além da geração de excedentes, os quais podem ser comercializados.

A Figura 4.4.d apresenta a evolução da polarização de Esteban e Ray entre as termelétricas brasileiras da biomassa florestal. Tomou agrupamento semelhante ao utilizado para a polarização entre os estados, resultando em quatro grupos (potência outorgada baixa, média, alta e muito alta). O comportamento da P_{ER} foi distinto do obtido para bipolarização, apresentando pouca variação, os valores médio da polarização (2000 a 2019) foram: $P_{ER(1.0)} = 0,1520$, $P_{ER(1.3)} = 0,1387$ e $P_{ER(1.6)} = 0,1294$. O intervalo com menor polarização ocorreu de 2002 a 2006, neste período os grupos de potência muito alta e alta apresentaram apenas um participante, o fenômeno ocorreu pela entrada da Veracel (BA), termelétrica de licor negro, com 117,04 MW outorgados. Os anos de 2000 e 2001

apresentaram as maiores polarizações, obtidos pelo baixo número de participantes do mercado.

Como observado na análise da polarização entre as termelétricas nacionais, a fonte de nível 2 utilizada para geração apresenta bastante impacto no potencial outorgado, sendo o recurso de maior oferta o licor negro. Com base nessa observação, a Figura 4.5 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal brasileiras, entre as fontes nível 2. a) Curva de Lorenz, b) Índice de Gini; c) Foster e Wolfson e d) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

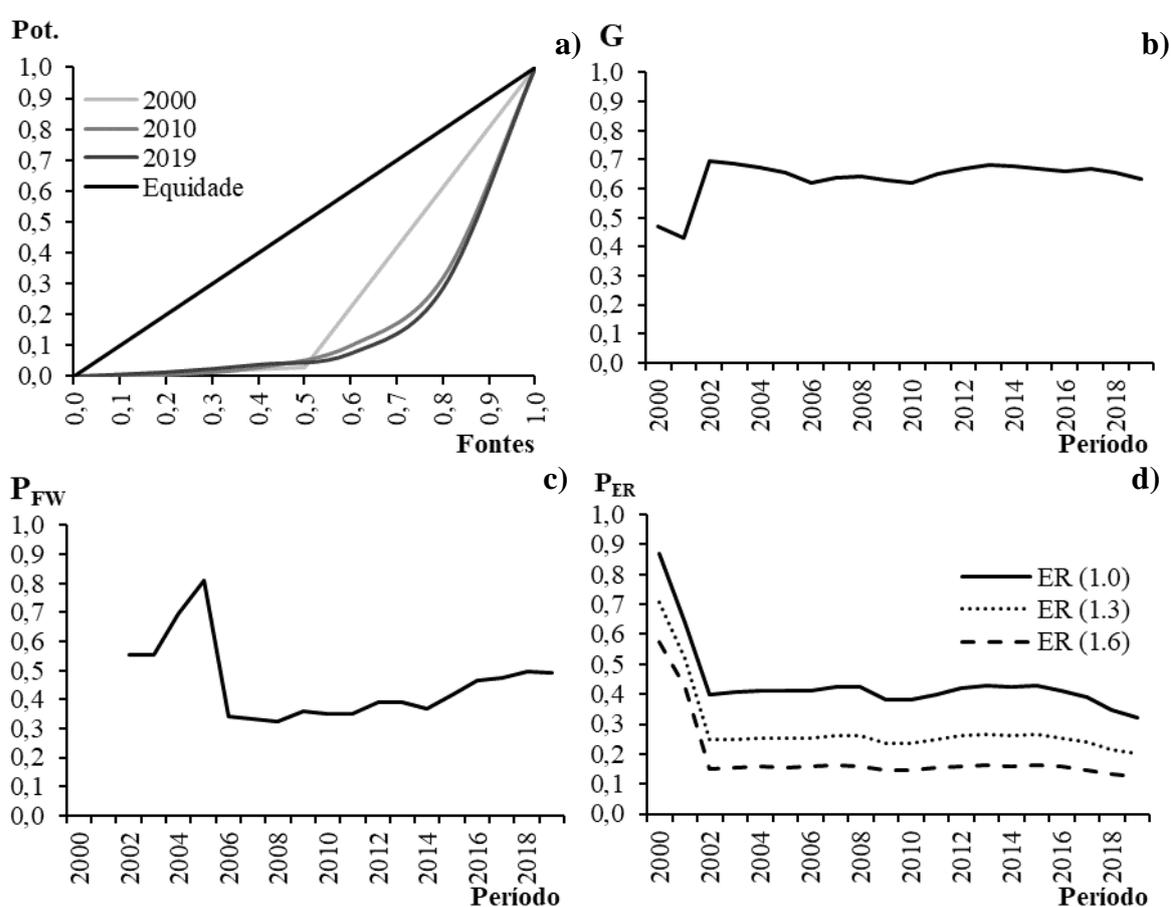


Figura 4.5. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal brasileiras, entre as fontes nível 2, de 2000 a 2019. Curva de Lorenz (a), Índice de Gini (b); Foster e Wolfson (c) e Esteban e Ray (d).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A curva de Lorenz mostrou aumento na desigualdade entre as fontes energéticas; em 2000, havia usinas apenas do licor negro e de resíduos florestais. Para 2010 houve registro de 5 fontes da biomassa (lenha, carvão vegetal, GAF, licor negro e resíduos

florestais), a maior parte da potência outorgada esteve contida no licor negro (68,10% - 1.151,68 MW). Para 2019, a curva apresentou ainda mais distanciamento da equidade, a última parcela da distribuição, representada pelo licor negro, representou 71,45% (2.524,18 MW) da oferta nacional.

O índice de Gini (Figura 4.5.b) apresentou valores elevados para todo o período, com média de 0,6358 e desigualdade de média a forte. O ano com maior G foi 2002 (0,6950), ocorrido devido a entrada de três novas fontes, em um cenário estável para o licor negro e resíduos florestais. Excetuando os dois anos iniciais, onde havia apenas duas fontes, em 2010 registrou-se a menor desigualdade, observada pelo aumento substancial na potência para o carvão vegetal, com destaque para entrada das usinas Gusa Nordeste (10,00 MW) e Simasa (8,00 MW), ambas no Maranhão, e para os resíduos florestais com a Berneck (12,00 MW).

A Figura 4.5.c apresenta a polarização de Foster e Wolfson para as fontes de nível 2, a P_{FW} alcançou seu pico no ano de 2005 e em seguida apresentou decréscimo, com novo aumento a partir de 2013, a P_{FW} média foi de 0,5349 (2002 a 2019). Para o ano de 2000 e 2001 não houve resultados relevantes para a bipolarização tendo em vista a existência de apenas 2 recursos da biomassa florestal. Até 2005, a contribuição do polo de baixa potência, composto pelo carvão vegetal, lenha e GAF apresentava participação de apenas 4,95% da oferta nacional. A partir de 2013, com a entrada da Klabin (PR), Eldorado Celulose e (MS) e Suzano Maranhão (MA) a P_{FW} apresentou novo aumento. O mesmo efeito apontado para a análise entre as termelétricas pode ser notado para o nível de fontes, reflexo do já apresentado por Darmawan et al. (2017).

Para a $P_{ER(1.6)}$, Figura 4.5.d, que incorpora maior interação entre os dados, observou-se polarização muito elevada para 2000 e 2001, resultante da existência de apenas dois grupos. A partir de 2002 houve pouca variação, evidenciando o constante controle do licor negro sobre a oferta. A $P_{ER(1.6)}$ médio foi 0,1870, que infere uma elevada polarização, com destaque para o licor e resíduos florestais como grupo de alta.

4.4 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou investigar a existência de polarização na bioeletricidade florestal no Brasil, entre 2000 e 2019, a fim de auxiliar a tomada de decisão e políticas públicas do setor energético. O método utilizado mostrou adaptabilidade ao objeto de

estudo, sendo sua aplicação, inédita, para análises energéticas no Brasil. A partir dos resultados alcançados pode-se concluir que embora o uso da bioeletricidade florestal no Brasil tenha aumentado, este crescimento proporcionou aumento do domínio das usinas de licor negro no cenário nacional.

A análise de conjuntura e a avaliação para as regiões mostrou que houve queda na polarização, associada, principalmente, ao crescimento da oferta na região Centro–Oeste do país. Para o nível regional observou queda para a P_{FW} e P_{ER} , sendo a maior polarização no período de 2002 a 2008, onde se destacou a região Sudeste como principal participante. A partir de 2013 o incremento no Sul e Centro-Oeste resultou na diminuição dos índices. Para o nível estadual houve aumento na polarização, resultado da outorga de grandes usinas do licor negro nos estados do Mato Grosso do Sul e Paraná, a partir de 2013.

Dentre as termelétricas observou comportamento semelhante ao estudo para unidades federativas, com aumento na bipolarização a partir de 2013, todavia a P_{ER} mostrou que os grupos de elevada capacidade outorgada não estiveram muito polarizados, que pode ocorrer pelo baixo número de participantes nos quartis de alta potência. Entre as fontes de nível 2, notou-se o domínio do licor negro e dos resíduos florestais, acarretando a existência de polos.

Os resultados obtidos podem auxiliar a tomada de decisão para novos investimentos no setor da bioeletricidade florestal, assim como políticas públicas que aumentem o desenvolvimento, seja regional ou tecnológico, da bioeletricidade florestal.

4.5 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: fev. 2020.

COULTER, P. B. **Measuring inequality**: A methodological handbook. Routledge, 2019.

CUENCA, G. M. A.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Rev. Econ. NE**, v. 47, n. 4, p. 91–106, 2016.

D'AMBROSIO, C. Household Characteristics and the Distribution of Income In Italy: An Application of Social Distance Measures. **Review of Income and Wealth**, v. 47, n. 1, p. 43–64, 2001.

DARMAWAN, A.; HARDI, F.; YOSHIKAWA, K.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Electricity production from black liquor: A novel integrated system. **Energy Procedia**, v. 142, p. 23–28, 2017.

DAWSON, R. How significant is a boxplot outlier? **Journal of Statistics Education**, v. 19, n. 2, p. 1–13, 2011.

DURO, J. A. The international distribution of energy intensities: Some synthetic results. **Energy Policy**, v. 83, p. 257–266, ago. 2015.

DURO, J. A.; PADILLA, E. Cross-Country Polarisation in CO₂ Emissions Per Capita in the European Union: Changes and Explanatory Factors. **Environmental and Resource Economics**, v. 54, n. 4, p. 571–591, abr. 2013.

ESTEBAN, J.-M.; RAY, D. On the Measurement of Polarization. **Econometrica**, v. 62, n. 4, p. 819, jul. 1994.

EZCURRA, R. Polarization trends across the US states. **Applied Economics Letters**, v. 16, n. 9, p. 897–902, mai. 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Data**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: mai. 2020.

FOSTER, J. E.; WOLFSON, M. C. Polarization and the decline of the middle class: Canada and the U.S. **The Journal of Economic Inequality**, v. 8, n. 2, p. 247–273, 19 jun. 2010.

GINI, C. Variabilità e mutabilità (1912). In: PIZETTI, E.; SALVEMINI, T. (Ed.). **Reprinted in memorie di metodologica statistica**. Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955.

HERNÁNDEZ, U. F.; JAEGER, D.; SAMPERIO, J. I. Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4, p. 1–19, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. [s.l.: s.n.]. Brasília: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: jun. 2020.

LERMAN, I. A note on the calculation the Gini index. **Economics Letters**, v. 15, p. 363–368, 1984.

LI, J.; WAN, G.; WANG, C.; ZHANG, X. Which indicator of income distribution explains crime better? Evidence from China. **China Economic Review**, v. 54, p. 51–72, abr. 2019.

LUNDMARK, R.; ATHANASSIADIS, D.; WETTERLUND, E. Supply assessment of forest biomass - A bottom-up approach for Sweden. **Biomass and Bioenergy**, v. 75, p. 213–226, 2015.

MEDEIROS, M. **Medidas de desigualdade e pobreza**. Editora Universidade de Brasília, 2012.

MEDINA, H. **Consideraciones sobre el índice de Gini para medir la concentración del ingreso**. Cepal, 2001.

MOLNAR, M. Income polarization in Romania. **Romanian Journal of Economic Forecasting**, v. 14, n. 2, p. 64–83, 2011.

SACIROVIC, S.; KETIN, S.; VIGNJEVIC, N. Eco-industrial zones in the context of sustainability development of urban areas. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 24, p. 24346–24356, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Boletim SNIF 2019**. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/producao/94-producao-economia-e-mercado-florestal>. Acesso em: jun. 2020.

VAN KERM, P. Generalized Gini and Concentration coefficients (with factor decomposition) in Stata. **CEPS/INSTEAD**, Di erdange, v. 1, p. 1–12, 2009.

WANG, J.; CAMINADA, K.; WANG, C. Measuring Income Polarization for Twenty European Countries, 2004–13: A Shapley Growth-Redistribution Decomposition. **Eastern European Economics**, v. 55, n. 6, p. 477–499, nov. 2017.

5 ARTIGO 4 - DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)

RESUMO

Este artigo analisou a distribuição e dependência espacial da oferta de bioeletricidade florestal, no Brasil, de 2000 a 2019. Os dados da outorga das termelétricas de biomassa florestal foram obtidos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Utilizou a análise exploratória de dados espaciais, e como critérios de vizinhança as matrizes de ponderação espacial de k-vizinhos mais próximos e com base na distância, bem como os índices de Moran global e local a fim de detectar a presença da dependência espacial. A análise de conjuntura, por quartis, evidenciou os estados da porção centro-sul do Brasil como as principais localizações das térmicas florestais. O I_{Moran_Global} destacou a diminuição da autocorrelação espacial, entre os anos de 2000 e 2019, associado a implementação de novas usinas termelétricas pelos grandes grupos Fibria, Klabin e Suzano Celulose em todo território nacional. O índice local (I_{Moran_Local}) apontou *clusters* de alta potência, principalmente nos anos iniciais, destacando: o eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, as térmicas do Paraná e as do Mato Grosso do Sul. O índice local também apontou *outliers*, que indicou possibilidade de associação das termelétricas com outras atividades, como a produção madeireira e indústrias do segmento siderúrgico e de papel e celulose. O conhecimento do padrão espacial do setor de bioeletricidade florestal, apresentado neste estudo, pode contribuir com os investidores e formuladores de políticas no auxílio de tomadas de decisão sobre a localização e a escala ideais da futura capacidade de bioeletricidade florestal.

Palavras-chave: Bioenergia, Economia espacial, Autocorrelação espacial, Clusters.

ARTICLE 4 - DISTRIBUTION AND SPATIAL DEPENDENCE OF FOREST BIOELECTRICITY IN BRAZIL (2000 - 2019)

ABSTRACT

This article analyzed the distribution and spatial dependence of the offer of forest bioelectricity in Brazil, from 2000 to 2019. The data for the granting of forest biomass thermoelectric plants were obtained from the National Electric Energy Agency (ANEEL). It used the exploratory analysis of spatial data, and as neighborhood criteria the spatial weighting matrices of k-neighbors closest and based on distance, as well as the global and local Moran indices in order to detect the presence of spatial dependence. The analysis of the situation, by quartile, showed the states of the central-southern portion of Brazil as the main locations of forest thermals. I_{Moran_Global} highlighted the decrease in spatial autocorrelation between the years 2000 and 2019, associated with the implementation of new thermoelectric plants by the large groups Fibria, Klabin and Suzano Celulose throughout the national territory. The local index (I_{Moran_Local}) pointed out high-powered clusters, especially in the early years, highlighting: the Bahia, Espírito Santo and Minas Gerais axis, the Paraná thermal plants and Mato Grosso do Sul thermal plants. The local index also pointed outliers, which indicated possibility of associating thermoelectric plants with other activities, such as wood production and industries in the steel and paper and cellulose segment. Knowledge of the spatial pattern of the forest bioelectricity sector, as presented in this study, can contribute to investors and policy makers in assisting decision-making about the ideal location and scale of future forest bioelectricity capacity.

Keywords: Bioenergy, Space economics, Spatial autocorrelation, Clusters.

5.1 INTRODUÇÃO

A biomassa consiste em insumos com potencial energético, agrupados em níveis: as florestas, a agricultura e os resíduos (CESPRINI et al., 2020). Os recursos florestais destinados à geração de energia podem ser obtidos de forma direta, resíduos de operação e desbaste das florestas, ou indiretamente, a partir dos resíduos de processos industriais (cavacos, briquetes, resíduos de moagem, pellets) (GOERNDT; AGUILAR; SKOG, 2013). Huron et al. (2017) destacaram que a biomassa florestal apresenta grande importância no suprimento energético mundial, embora ainda seja subutilizada.

Em 2017, a oferta de energia primária mundial a partir da biomassa atingiu 55,60 EJ (Exajoules), dos quais 48,18 EJ (86,65%) foram fornecidos a partir dos biocombustíveis sólidos, 3,65 EJ (6,56%) de biocombustíveis líquidos, 1,45 EJ (2,61%) de resíduos de poda urbana, 1,06 EJ (1,91%) de resíduos da indústria da madeira e 1,33 EJ (2,39%) do biogás. Entre as regiões, a Ásia foi a principal, com 21,6 EJ (38,85%), seguiram a África (15,4 EJ - 27,70%); a América (10,8 EJ - 19,42%), a Europa (0,28 EJ - 13,53%) e a Oceania (0,28 EJ - 0,5%) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

No Brasil, a oferta de energia interna, em 2019, foi 294,04 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), dos quais a biomassa representou 78,56 milhões tep (26,72%), com 8,75% obtido da madeira. Na matriz elétrica, a biomassa florestal apresentou 3,24 GigaWatts (GW) outorgados (1,88% do nacional), sendo o licor negro a principal fonte (78,19%), seguida dos resíduos florestais (13,83%), gás de alto forno (3,95%), lenha (2,54%) e carvão vegetal (1,49%) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2020; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2020).

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2019), no Brasil, a bioeletricidade atende, principalmente, as demandas das indústrias do setor madeireiro e siderúrgico, a partir do processo de cogeração. A localização destes empreendimentos está diretamente relacionada à rede de suprimentos e com as atividades realizadas por cada empresa; as decisões do posicionamento envolvem ainda estratégias financeiras e impactam na produtividade de uma região (BHATNAGAR; SOHAL, 2005; HUGOS, 2011; ROCHA; PEROBELLI, 2020).

Os estudos econômicos espaciais tornam-se ferramentas importantes para analisar a interação de variáveis (CABRAL et al., 2017). Para Almeida (2012), as avaliações convencionais da economia falhavam ao explicar eventos no espaço. Para tal, o autor

ressalta a importância das medidas que trabalham com os efeitos da autocorrelação e heterogeneidade espacial. Tian, Song e Li (2014) afirmaram que a autocorrelação pode ser interpretada com base na Primeira Lei da Geografia, partindo do princípio estabelecido por Tobler (1970), que tudo está relacionado, porém a influência de variáveis próximas ao objeto de estudo é mais perceptível que as distantes. Por sua vez, o efeito da heterogeneidade espacial está associado a Segunda Lei da Geografia e é resultante do uso de dados de unidades espaciais muito distintas para tentar explicar um fenômeno, que resulta em instabilidade estrutural (GOODCHILD, 2004; SILVA et al., 2011).

A incorporação do aspecto espacial na modelagem econômica tem apresentado aumento na literatura. Perobelli e Oliveira (2013) apontaram que os regimes espaciais fazem uma diferença crucial em uma análise e podem ter implicações nas políticas governamentais e de mercado. Sob esse ponto de vista, as abordagens espaciais são importantes para o setor energético, tendo em vista que o consumo de energia e a oferta de eletricidade variam no tempo e no espaço. Os estudos da economia utilizam das análises exploratória de dados espaciais (AEDE) para descrever a distribuição espacial, a existência de regimes espaciais e verificar observações atípicas no setor energético. Pan e Li (2019) observaram o agrupamento espacial do consumo elétrico em algumas províncias chinesas, entre os anos de 2000 e 2012. Wang et al. (2019) utilizaram do índice de Moran para avaliar a relação entre índices econômicos e indicadores energéticos de alguns países da Ásia e Europa, os autores destacaram a existência de autocorrelação, principalmente no continente asiático.

Outros trabalhos foram He, Guang e Wang (2018) para análise espacial do consumo de eletricidade na China e Mashhoodi (2018) na Holanda. No Brasil, Cabral, Legey e Freitas Cabral (2017) constataram que o consumo regional de eletricidade no Brasil está autocorrelacionado e Perobelli e Oliveira (2013) avaliaram o potencial de desenvolvimento energético dos estados brasileiros, indicando conglomerados de alta intensidade de energia para região Sul e Sudeste e de baixa para a porção centro-norte do país.

Diante a importância da biomassa florestal na matriz elétrica brasileira e a necessidade de compreender sua distribuição espacial para orientação de políticas públicas focadas, este artigo analisou a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Objeto de estudo

As termelétricas de biomassa florestal estão disponíveis nos Sistema de Informações da Aneel (SIGA) da ANEEL, no período de 2000 a 2019. As usinas estão classificadas em nível 1 (biomassa florestal) e nível 2 (lenha, carvão vegetal, gás de alto forno, licor negro e resíduos florestais). As informações das outorgas dessas térmicas foram obtidas da biblioteca digital (Sophia) da ANEEL.

Realizou-se uma análise de conjuntura da quantidade e da potência outorgada (MW) das termelétricas da bioeletricidade florestal (nível 1 e 2) para 2000, 2010 e 2019. Utilizou a Taxa de crescimento geométrica (TGC), Equação 1, para observar as alterações (aumento e diminuição) na oferta entre 2000 e 2019 (CUENCA; DOMPIERI, 2016).

$$TGC[\%] = \left[\sqrt{\frac{V_F}{V_O}} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

Em que, V_F = quantidade ou potência outorgada (MW) da biomassa florestal no ano final; V_O = a quantidade ou potência do ano inicial; Δt é a variação temporal (expressa em anos).

Estabeleceram níveis (em quartis) da oferta para os estados brasileiros. As categorias foram de potência baixa (Quartil um – Q1), média (Quartil dois – Q2), alta (Quartil três – Q3) e muito alta (Quartil quatro – Q4). Os quartis foram categorizados pela primeira quarta parte da potência outorgada (MW), o Q1 ($0 < Q1 \leq 25\%$), segunda quarta parte, o Q2 ($25\% < Q2 \leq 50\%$), terceira quarta parte, o Q3 ($50\% < Q3 \leq 75\%$) e quarta parte final, o Q4 ($75\% < Q4 \leq 100\%$) (YADAV; SINGH; GUPTA, 2019).

5.2.2 Análise Exploratória de Dados Espaciais

A análise exploratória de dados espaciais (AEDE) é um método utilizado para a avaliação de autocorrelação espacial, verificação de instabilidades espaciais e a identificação de *outliers* (COELHO JUNIOR et al., 2018). Segundo Jing e Cai (2010) as análises de dados em zonas geográficas geralmente implica na identificação de resíduos autocorrelacionados positivamente, ou seja, resíduos altos agrupando-se em uma mesma região.

A autocorrelação espacial representa o quanto uma dada variável da região i (potência outorgada da bioeletricidade florestal) encontra-se relacionada com a mesma variável em uma região vizinha j . Para este trabalho foram considerados como unidades espaciais as localizações das usinas termelétricas da biomassa florestal (nível 1 e 2), a partir de coordenadas geográficas; assim, cada empreendimento representou uma unidade territorial. O método utilizado para análise de vizinhos foi baseado na distância entre as usinas, sendo considerado o k -vizinhos, observando-se o comportamento espacial para os 2, 4, 6, 8 e 10 vizinhos mais próximos. Também se observou a vizinhança com base na distância radial, ou seja, considerando vizinhos, localizações no interior de um raio mínimo em quilômetros (Km); desta forma não foram admitidos pontos isolados na análise. Para verificar o padrão espacial com base nos k -vizinhos foram construídas matrizes de ponderação W :

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{ij}(k) = 0 \quad \text{se } i = j \\ w_{ij}(k) = 1 \quad \text{se } d_{ij} \leq D_i(k) \quad \text{e} \quad w_{ij}(k) = \frac{w_{ij}(k)}{\sum_j w_{ij}(k)} \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, n \\ w_{ij}(k) = 0 \quad \text{se } d_{ij} > D_i(k) \end{array} \right.$$

em que: d_{ij} é a distância entre as termelétricas i e j . $D_i(k)$ é um valor crítico que define o valor de corte, ou seja, a distância máxima para considerar regiões vizinhas à região i (PEROBELLI et al., 2007).

5.2.2.1 Indicadores de Autocorrelação espacial

A AEDE fornece medidas de autocorrelação espacial global e local, que são fundamentais para delinear a desigualdade espacial. As medidas globais detectam a correlação incorporando todas as amostras de estudo, enquanto índices locais concentram-se apenas no relacionamento específico em um local no espaço (YANG; WONG, 2013).

I Moran global (I_{Moran_Global})

A autocorrelação espacial global é uma medida do agrupamento geral e é avaliada por meio de um teste de uma hipótese nula de localização aleatória (ANSELIN, 2001).

Druck et al. (2004) citaram que a caracterização da dependência espacial permite identificar valores correlacionados em uma região, constituindo um aspecto fundamental da análise espacial. As funções utilizadas para estimar o impacto da variável de estudo em uma região são dependentes dos valores das mesmas nas localizações vizinhas, ou seja, há uma autocorrelação espacial. Para mensuração desta autocorrelação utilizou o índice global de Moran (I_{Moran_Global}) (Equação 1).

$$I_{Moran_Global} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

em que, n = número de termelétricas da biomassa florestal, W_{ij} = valor da matriz de ponderação, Y_i = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto i ; Y_j = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto j ; \bar{Y} = média da potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) na região de estudo. Quando as variáveis são espacialmente independentes, o valor esperado de I_{Moran_Global} é zero. Quando as variáveis são espacialmente dependentes, poderá ser apresentada similaridade entre áreas próximas, em que I_{Moran_Global} será positivo ($I_{Moran_Global} > 0$), ou dissimilaridade, em que I_{Moran_Global} será negativo ($I_{Moran_Global} < 0$) (SILVA et al., 2011). Os resultados foram apresentados em um diagrama de espalhamento (Figura 5.1).

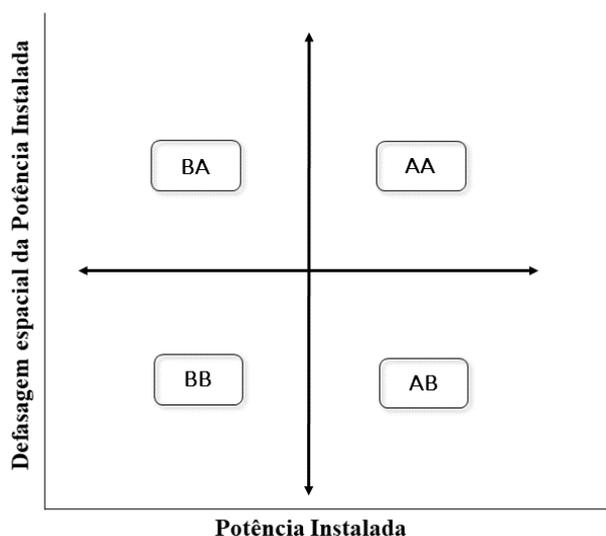


Figura 5.1. Diagrama de dispersão de Moran.

Fonte: Adaptado de Coelho Junior et al., 2018.

A interpretação do diagrama indica que para elevada potência outorgada, com vizinhança alta tem-se o padrão AA (Alto–Alto), enquanto baixos valores de potência, com vizinhança baixa tem-se o BB (Baixo–Baixo). Por sua vez, os valores dissimilares entre a termelétrica observada e seus vizinhos, pode ser observado no AB (Alto-Baixo) para termelétricas de alta oferta, com vizinhos de baixa ou no BA (Baixo–Alto) em termelétricas de baixa oferta, com vizinhos de alta. Considerou o valor de significância para o I_{Moran_Global} a 10% ($pvalor \leq 0,1$).

I Moran local (I_{Moran_Local})

Para Druck et al. (2004), quando se tem um grande número de áreas em uma determinada região em estudo, é muito provável que ocorra diferentes regimes de associação espacial, e que apareçam vários locais de autocorrelação espacial. Ainda que o índice I_{Moran_Global} seja útil para fornecer uma indicação de agrupamento global dos dados, esta medida precisa ser complementada por estatísticas locais. Segundo Anselin (2001), o I_{Moran_Local} (Equação 2), atende as condições de identificação de padrões de associação espacial significativa, para cada área da região observada, e constitui uma decomposição do índice global de associação espacial. A soma dos indicadores de associação espacial local para todas as observações é proporcional ao indicador de associação espacial global.

$$I_{Moran_Local} = (Y_i - \bar{Y}) \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

n

em que, n = número de termelétricas da biomassa florestal, W_{ij} = valor da matriz de ponderação, Y_i = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto i ; Y_j = potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) no ponto j ; \bar{Y} = média da potência outorgada da bioeletricidade florestal (nvl. 1 ou 2) na região de estudo. De acordo com Silva et al. (2011), assim como no diagrama de dispersão do I_{Moran_Global} , valores positivos do Índice de Moran local significam que existem *clusters* espaciais com valores similares (alto ou baixo) da variável observada. Valores negativos significam que existem *clusters* espaciais com valores dissimilares da variável entre as áreas e seus vizinhos.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5.2 apresenta a distribuição espacial brasileira das termelétricas e da potência outorgada (MW) em quartis da bioeletricidade florestal, m 2000, 2010 e 2019.

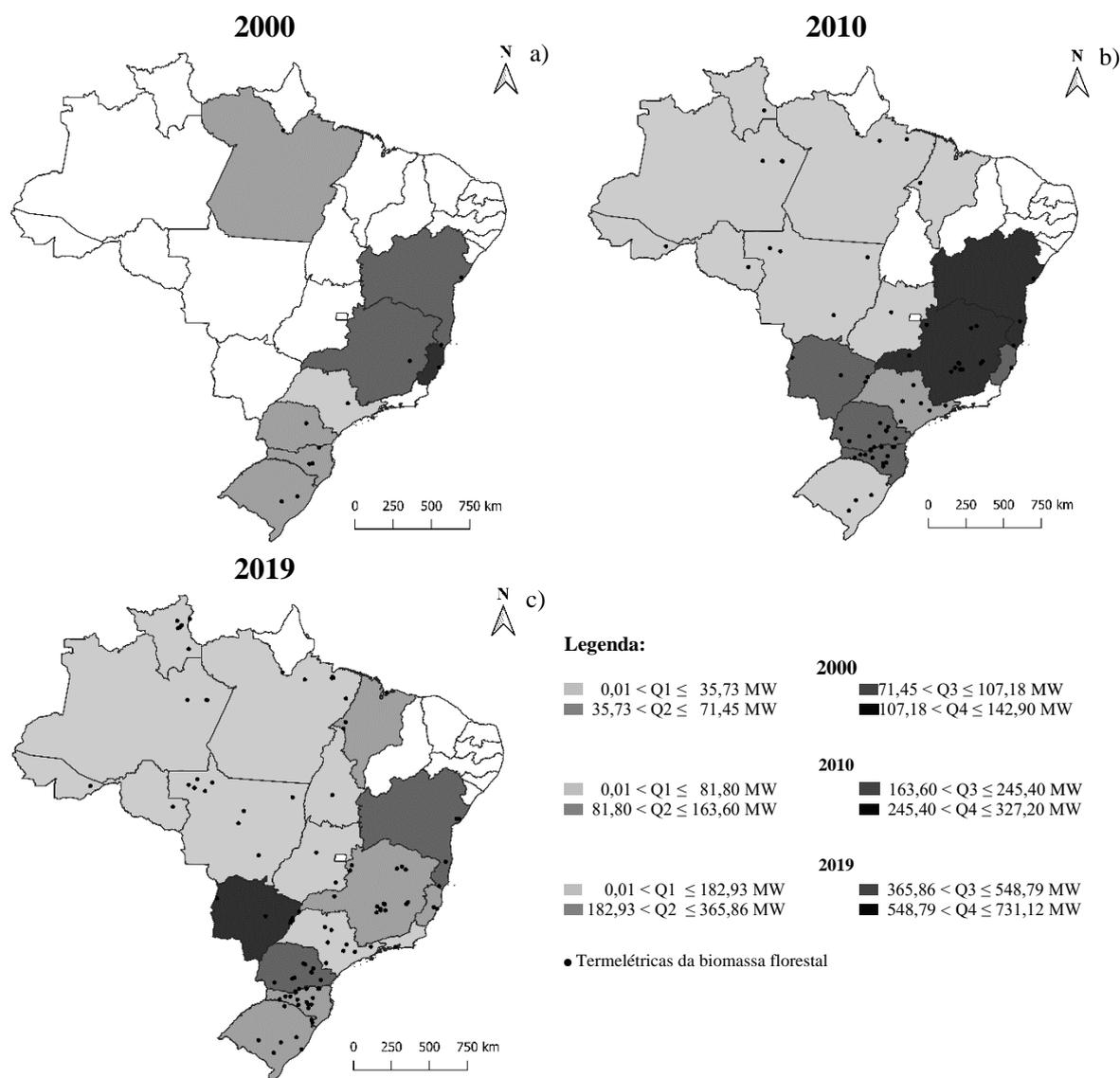


Figura 5.2. Distribuição espacial brasileira das termelétricas e os quartis da potência outorgada (MW) para a bioeletricidade florestal, para 2000, 2010 e 2019.

Fonte: ANEEL, 2020.

Em 2000, Figura 5.2.a, havia 11 termelétricas da biomassa florestal, no território nacional, com 562,90 MW outorgados, onde 9 usinas foram do licor negro (546,10 MW) e 2 dos resíduos florestais (18,80 MW). Apenas a região Centro-Oeste não apresentou disponibilidade da bioeletricidade florestal. Entre os estados houve 8 participantes; para o

quartil 4 (muito alto), esteve o Espírito Santo (142,90 MW); embora tenha sido registrado elevada disponibilidade, apenas a Aracruz foi responsável pela oferta, utilizando o licor negro como combustível.

Participaram do terceiro quartil (alto), a Bahia (105,60 MW) e Minas Gerais (100,00 MW). O estado baiano contou com 2 térmicas, a Suzano Mucuri (92,00 MW) e a Bahia Pulp (13,60 MW), ambas a licor negro e do setor de celulose; para MG a oferta ocorreu a partir da termelétrica Cenibra (100,00 MW), também do segmento de celulose. O segundo quartil (média) apresentou o maior número de participantes, com 4 estados. O Pará contou com a maior potência outorgada para o quartil, com 55,00 MW, a partir da Jari Celulose; em seguida estiveram: o Paraná (48,85 MW), o Rio Grande do Sul (48,80 MW) e Santa Catarina (46,75 MW), quase todo potencial obtido do licor negro, exceto pela Central Termelétrica de Geração (RS) que usou os resíduos florestais. O primeiro quartil (baixa) apresentou São Paulo com 15,00 MW, obtidos dos resíduos florestais da termelétrica Ripasa.

Em 2010, Figura 5.2.b, o Brasil apresentou 71 termelétricas e 1.690,93 MW outorgados da bioeletricidade florestal, que representou crescimento médio anual de 23,02% no número de termelétricas e de 13,00% para a potência outorgada, em comparativo a 2000. Dentre as fontes de nível 2, os resíduos florestais apresentaram o maior crescimento para quantidade de empreendimentos, passando de 2 para 42 termelétricas (40,25% a.a.), enquanto as térmicas de licor negro tiveram o maior aumento de potência outorgada, chegando a 1.151,68 MW (8,64% a.a.). Durante o intervalo de 2000 – 2010, houve inserção de três novas fontes energéticas, a lenha (2 termelétricas e 9,00 MW), o carvão vegetal (5 termelétricas e 40,10 MW) e o gás de alto forno – biomassa (GAF) (9 termelétricas e 119,10 MW).

Entre os quartis estaduais, a Bahia (327,20 MW) e Minas Gerais (249,18 MW) mantiveram-se no Q4. A Bahia contou com 3 termelétricas e ambas à base do licor negro (Veracel, Bahia Pulp e Suzano Mucuri), com elevado potencial das indústrias de papel e celulose, ao Sul do estado e no polo industrial de Camaçari – Bahia (Bahia Pulp). O estado baiano, com ênfase na porção Sul, apresenta elevada viabilidade econômica para de produção florestas, o que auxilia o desenvolvimento de indústrias e termelétricas associadas (VALDETARO et al., 2011). Para Minas Gerais foram 13 térmicas (7 do GAF, 4 de resíduos florestais, 1 do licor negro e 1 do carvão vegetal), a usina com maior potencial foi, novamente, a Cenibra (100,00 MW); o estado mineiro despontou no uso do

carvão vegetal e GAF, principalmente, pelas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas existentes no território (SILVA; MATHIAS; BAJAY, 2018).

No Q3 (alto) estiveram os estados do Espírito Santo (210,40 MW), Mato Grosso do Sul (192,04 MW), Paraná (180,58 MW) e Santa Catarina (175,62 MW), este quartil estabeleceu a importância da zona centro-sul do Brasil na oferta, que pode ser associado a elevada produção florestal destas regiões (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). Apenas São Paulo compôs o Q2 (média) para 2010, o estado contou com 6 termelétricas e 125,21 MW, com destaque para a expansão de potência da Ripasa (53,48 MW) e para a Lwarcel (38,00 MW), principal usina de licor negro do estado. O quartil 1 (baixo) apresentou o maior número de participantes (9 estados), o de maior disponibilidade foram o Rio Grande do Sul (69,76 MW) e o Pará (55,61 MW), para a quantidade destacou o Mato Grosso com 4 termelétricas e 11,80 MW.

Para 2019 (Figura 5.2.c) foram registradas 115 termelétricas e 3.532,61 MW outorgados, com participação de 18 estados. O crescimento da bioeletricidade florestal no Brasil (2000 a 2019) foi 13,15% a.a. para a quantidade de termelétricas e de 10,15% a.a. para a capacidade outorgada. O quartil 4 (muito alta) apresentou o Mato Grosso do Sul como único participante, com 7 termelétricas e 731,32 MW outorgados (20,71% da capacidade outorgada nacional). As fontes participantes foram o licor negro (3 termelétricas e 658,78 MW), os resíduos florestais (2 termelétricas e 56,00 MW) e o gás de alto forno (2 termelétricas e 16,94 MW). O estado deteve a segunda e a quinta maiores usinas do país, a Fibria MS II (269,58 MW) e a Eldorado Celulose (214,10 MW). Para o quartil 3 (alta) estiveram os estados do Paraná (513,98 MW) e da Bahia (456,51 MW), que reforça a associação entre a bioeletricidade florestal e as maiores indústrias de papel e celulose do Brasil. A maior usina do país esteve encontrada no Q3, a Klabin Celulose, com 330,00 MW ofertados a partir do licor negro.

Para o Q2 (média) houve cinco estados participantes, o Rio Grande do Sul (354,51 MW), Minas Gerais (314,23 MW), Maranhão (287,44 MW), Espírito Santo (213,90 MW) e Santa Catarina (193,02 MW). A usina com maior disponibilidade para este quartil foi a Suzano Maranhão - MA, com 245,84 MW outorgados, seguida da CMPC - RS (254,84 MW) e a Aracruz - ES (210,40 MW), todas à base do licor negro. No quartil 1 (baixa) participaram: São Paulo (116,59 MW), Mato Grosso (109,20 MW), Pará (78,31 MW), Roraima (59,30 MW), Acre (30,47 MW), Rondônia (24,00 MW), Goiás (18,20 MW),

Amazonas (17,03 MW), Tocantins (11,50 MW) e Rio de Janeiro (2,70 MW), as principais usinas foram a Jari Celulose – PA (55,00 MW) e a Ripasa – SP (53,48 MW).

Para testar a dependência espacial da oferta da bioeletricidade florestal no Brasil foram calculados os índices de autocorrelação espacial global (I_{Moran_Global}) e local (I_{Moran_Local}). A Tabela 5.1 apresenta o I_{Moran_Global} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para matriz de k-vizinhos mais próximos (2, 4, 6, 8 e 10) e para distância (Km), para 2000, 2010 e 2019. O arranjo de 2 vizinhos mais próximos apresentou o maior número de resultados estatisticamente significativos, com o $p\ valor \leq 0,1$, foram oito observações, seguido das convenções de 4 e 6 vizinhos, cada qual com 7 resultados significativos. Para 2000, notou-se resultados mais relevantes para a matriz de 2 vizinhos, indicando autocorrelação positiva para as termelétricas florestais e de licor negro. As matrizes de 8 e 10 vizinhos e a vizinhança baseada na distância apresentaram resultados negativos para autocorrelação espacial, todavia estes arranjos utilizaram quase a totalidade das usinas instaladas em 2000 (11 termelétricas), sendo os resultados de pouca relevância estatística.

Em 2010, todas as matrizes utilizadas apresentaram autocorrelação positiva significativa, para o nível florestal, a um nível de 10,00%. Para as fontes de nível 2, identificou-se correlação positiva para o gás de alto forno e negativa para o carvão vegetal. Para 2019, também se observou autocorrelação positiva para o nível florestal em todos os modelos matriciais. Segundo Almeida (2012) a escolha da matriz de ponderação utilizada para um determinado objeto de estudo pode ser embasada no arranjo de vizinhança com maiores valores para o I_{Moran_Global} , sendo então apresentado o detalhamento para 2 vizinhos.

A Figura 5.3 que apresenta o diagrama de dispersão do I_{Moran_Global} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019. Para o nível 1 (florestal), em 2000, o I_{Moran_Global} foi 0,528, apontando tendências de autocorrelação espacial positiva, com elevada significância estatística. Nas observações AA estiveram as usinas Suzano Mucuri – Bahia (92,00 MW), Aracruz – ES (142,90 MW) e Cenibra – MG (100,00 MW), formando um complexo na região do sul da Bahia e do norte do Espírito Santo e Minas Gerais. Para 2010, com a entrada de 60 novas termelétricas, houve diminuição na autocorrelação ($I_{Moran_Global} = 0,257$). Os principais pontos de alavancagem para o índice foram identificados como as usinas Suzano Mucuri – Bahia (92,00 MW) e

Veracel - Bahia (126,60 MW), indicando um novo conglomerado no estado baiano. Em 2019, o I_{Moran_Global} foi 0,202, a maior parte das observações apresentaram centralidade no plano, com poucos pontos de alavancagem no quadrante 1, todos associados as usinas de licor negro.

Tabela 5.1. Índices de Moran global da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para matriz de k-vizinhos mais próximos (2, 4, 6, 8 e 10) e para distância (Km), para 2000, 2010 e 2019.

Ano	Biomassa	k-vizinhos					Distância	Raio Viz. (Km)
		2	4	6	8	10		
2000	Flor.	0,528***	0,133**	0,017**	-0,115	-0,100**	-0,188	1997,09
	LN	0,486**	0,012	-0,228**	-	-	-0,239	1997,09
	RF	-	-	-	-	-	-	-
	GAF	-	-	-	-	-	-	-
	CV	-	-	-	-	-	-	-
	Le	-	-	-	-	-	-	-
2010	Flor.	0,257**	0,279***	0,262***	0,194***	0,151***	0,042**	808,93
	LN	0,229**	-0,038	-0,096	-0,034	-0,081	-0,092	1997,09
	RF	0,088	0,014	-0,05	-0,002	-0,022	-0,041	808,93
	GAF	0,162**	0,089**	-0,133	-0,125	-	-0,145	425,23
	CV	-0,48	-0,25**	-	-	-	-	63,945
	Le	-	-	-	-	-	0,934***	-
2019	Flor.	0,202***	0,216***	0,135***	0,098**	0,098	0,132**	431,74
	LN	-0,147	-0,178	-0,151	-0,154	-0,092	-0,191	698,98
	RF	-0,087	-0,046	-0,028	-0,043	-0,035	-0,071	598,55
	GAF	0,176**	0,024*	0,033**	-0,114	-0,098	-0,08	1875,09
	CV	0,744**	0,459***	0,038***	-	-	0,728**	411,84
	Le	-0,038	-0,062	-0,037**	-	-	-0,081	726,05

Nota: *** p-valor $\leq 0,01$; ** p-valor $\leq 0,05$; * p-valor $\leq 0,10$.

Legenda: Raio Viz. = Raio de vizinhança, Flor. = Floresta, LN = Licor negro, RF = Resíduo florestal, GAF = Gás de alto forno, CV = Carvão vegetal e Le = lenha.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para o nível de licor negro houve decréscimo no I_{Moran_Global} para todos os anos; apenas em 2000, a existência do complexo de alta entre MG-BA-ES, como observado para o nível florestal, elevou o valor do índice. Durante a década de 2010, a expansão e implementação de novos sistemas, pelos grupos Klabin S.A. e Suzano Celulose S.A., no estado do Paraná, Mato Grosso do Sul e Maranhão, ocasionou a queda na autocorrelação espacial. O nível de resíduos florestais só apresentou 2 termelétricas para 2000, dessa forma o I_{Moran_Global} não foi calculado. Para 2010, a autocorrelação foi praticamente nula, assim como em 2019. Os principais pontos de alta foram as térmicas Onça Pintada – MS (50,00 MW) e Ripasa – SP (53,48 MW), as quais participam de um conglomerado entre a região de Três Lagoas – MS e o estado de São Paulo.

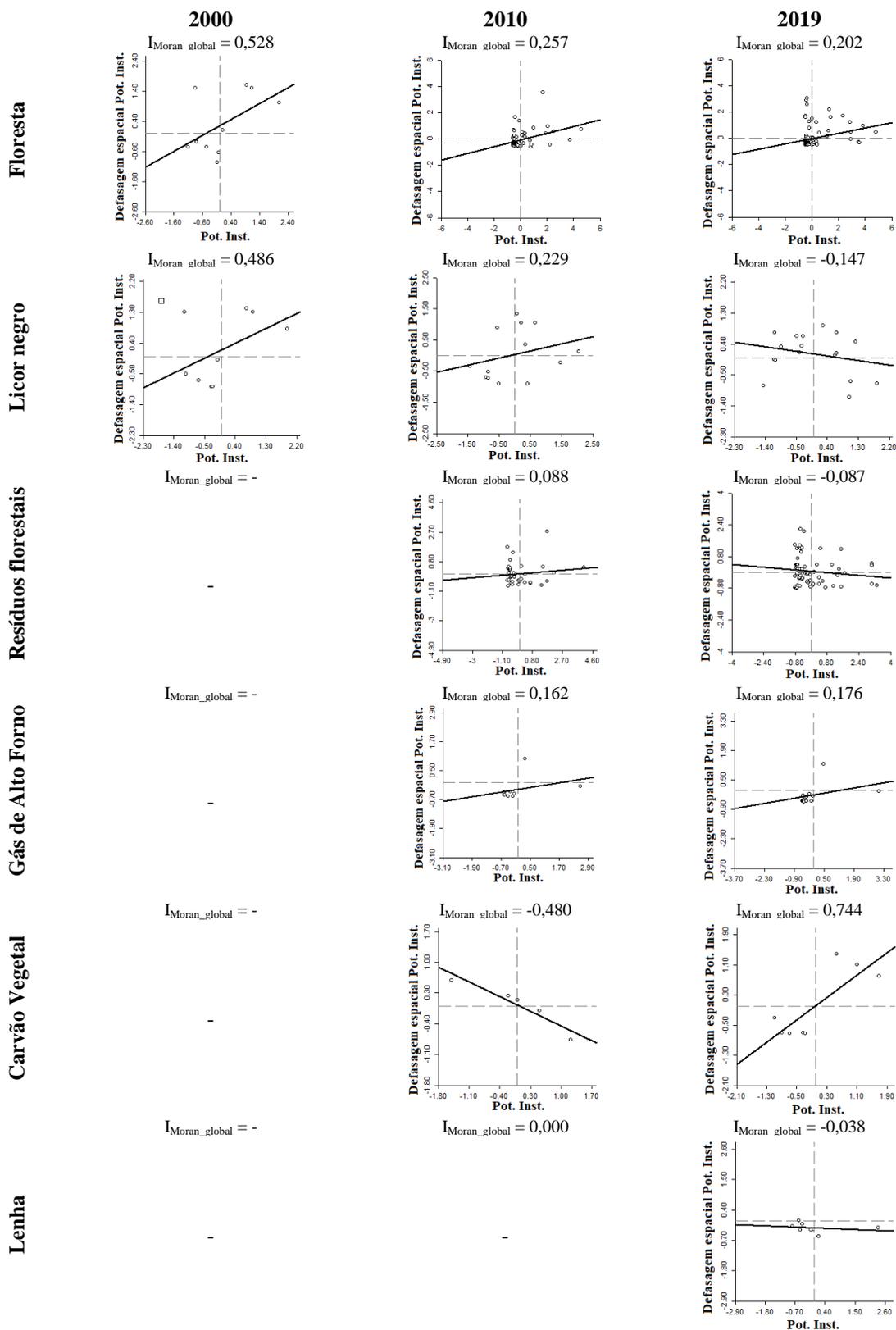


Figura 5.3. Diagrama de dispersão do I_{Moran_Global} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1 e 2, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para o gás de alto forno houve autocorrelação espacial positiva significativa, com destaque para pontos de alavancagem das termelétricas Usiminas e Usiminas 2, ambas localizadas no estado de Minas Gerais e relacionadas ao setor siderúrgico. O carvão vegetal foi o recurso com menor valor para o I_{Moran_Global} , em 2010, indicando autocorrelação espacial negativa, resultado da descentralização da oferta do recurso, com usinas de alta potência no estado do Maranhão e térmicas, com baixa disponibilidade, no estado de Minas Gerais. Em 2019, a correlação tornou-se positiva, principalmente com a implementação de termelétricas nos polos mineiro e maranhense. Para a lenha, o índice foi calculado apenas em 2019, dado o baixo número de participantes, com valor de -0,038, sem significância estatística; assim, notou inexistência de autocorrelação espacial.

A Figura 5.4 apresenta a distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019. Em 2000, observou-se 5 localizações (termelétricas) significativas para aglomeração espacial. Para configuração AA, anotou-se 2 termelétricas: a Suzano Mucuri – Bahia (92,00 MW), Cenibra – MG (100,00 MW) e Aracruz Celulose (210,40 MW) as quais apresentaram uso do licor negro na geração de eletricidade. Para o padrão BA, houve uma observação, a Central Termelétrica de Geração (1,8 MW), a qual apresentou vizinhança com a CMPC (47,00 MW) e a Klabin Correia Pinto (37,82 MW). Para a associação BB também se notou apenas uma usina, a CMPC (47,00 MW), localizada em Gaíba – RS, este empreendimento apresentou expansão durante a década de 2000, embora tenham apresentado significância estatística, estes resultados estiveram relacionados a apenas 11 termelétricas instaladas, o que resulta em influência na análise do I_{moran_local} .

Em 2010, Figura 5.4.b, foram identificadas oito termelétricas com associação espacial significativa. Para a associação AA houve 3 termelétricas destacadas, o agrupamento esteve sobre os estados da Bahia e Minas Gerais, com três termelétricas: Usiminas II (63,15 MW), para o gás de alto forno e a Bahia Pulp (13,60 MW) e Suzano Mucuri (92,00 MW), utilizando licor negro e associadas as indústrias de celulose e papel. Marques (2015) destacou a importância dos estados da Bahia como um dos grandes polos brasileiros para as indústrias de papel e celulose, o que pode justificar o *cluster* de alta potência.



Figura 5.4. Distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 1, para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, para 2000, 2010 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Apenas a Brasil Bio Fuels (16,00 MW), localizada em São João da Baliza – RR, apresentou classificação de baixa capacidade outorgada com vizinhança baixa (padrão BB). A associação de BA apresentou 2 usinas, foram: a Vetorial - MS (6,94 MW) e vizinhança com a PIE-RP – SP (27,80 MW) e Vetorial Corumbá – MS (10,00 MW); e a Usiminas (18,81 MW), com vizinhança com a Usiminas II – MG (63,15 MW) e Cenibra - MG (100,00 MW). A associação espacial AB (*outliers* de alta) foi identificada para as usinas

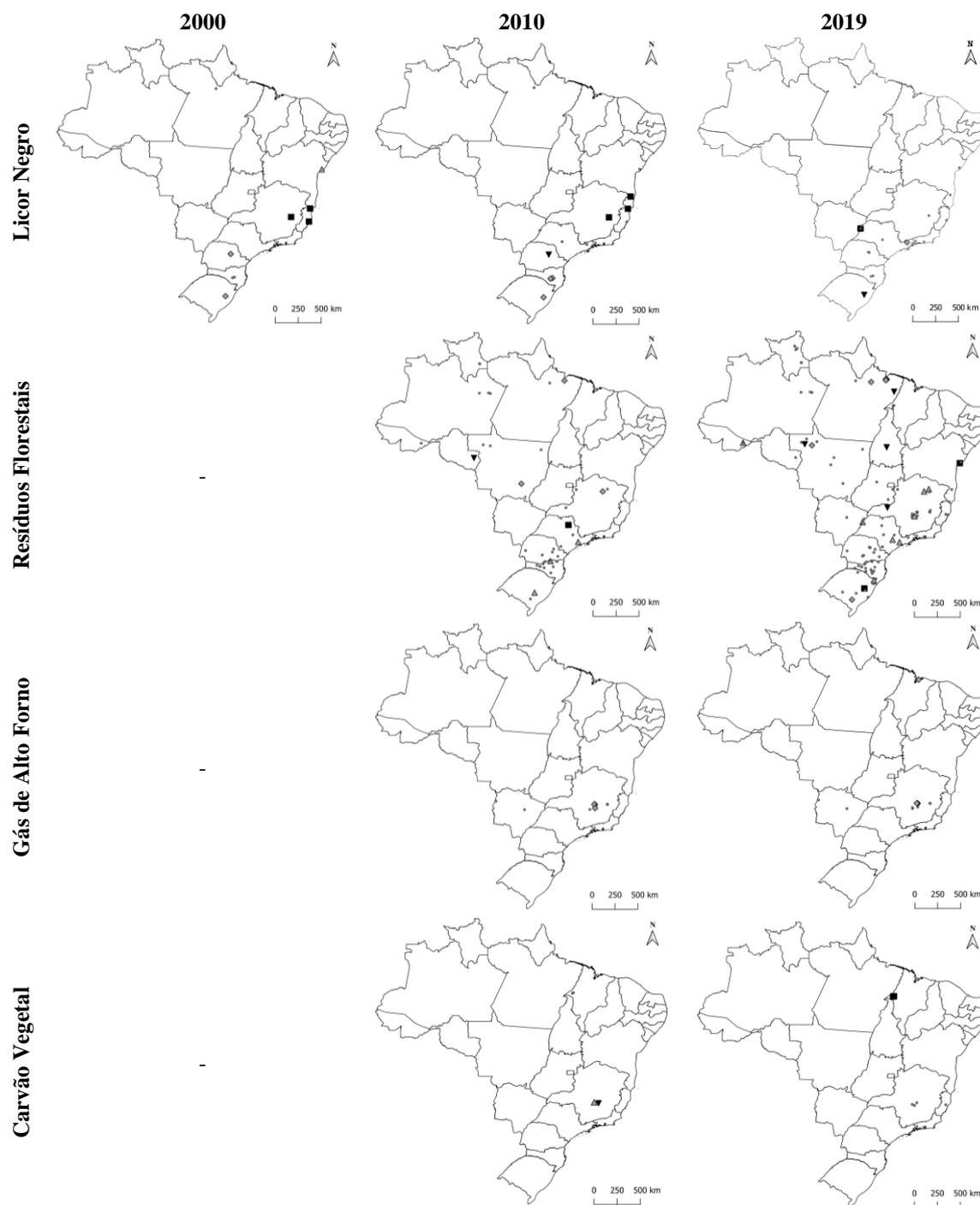
Rondon II – RO (24,00 MW) e a Jari Celulose – PA (55,00 MW), as quais representaram 66,42% da oferta da bioeletricidade florestal do Norte do país.

No ano de 2019, Figura 5.4.c, foi identificada associação espacial significativa para 26 usinas. O padrão espacial BB foi o com maior quantidade de casos, 11 termelétricas apresentaram este nível de associação. Destacou-se como *clusters* de baixa potência, o conglomerado no estado do Pará (Breves, Juruá Florestal, Pampa, Ebata e Tramontina), o do Mato Grosso (Egídio, Atos e Guaçu), além das termelétricas Siderpa e Metalsider, localizadas em Minas Gerais e a Piratini, do Rio Grande do Sul.

Para configuração AA destacaram-se as usinas Fibria MS (175,10 MW) e Fibria MS-II (269,58 MW), ambas do município de Três Lagoas – MS, a Onça Pintada (50,00 MW), localizada em Aparecida do Taboado, também no estado do MS; e a Klabin (132,50 MW), situada no estado do Paraná. Observou-se duas usinas para este padrão, a Veracel (117,04 MW), na Bahia e a Aracruz (210,40 MW), no Espírito Santo, ambas utilizando o licor negro como recurso energético.

Para 2019, notou-se sete *outliers* do tipo BA: Madem – RS (1,00 MW), Central Termelétrica da Geração – RS (1,80 MW), João Neiva – ES (3,50 MW), Cargill-Três Lagoas (6,00 MW), Vetorial – MS (6,94 MW), ERB Candeias – BA (16,79 MW), CGVE Innova – RS (30,00 MW), de forma geral, a vizinhança com grandes empresas do setor de celulose e papel provocaram este efeito sobre a distribuição. Para o padrão AB estiveram as termelétricas: Ripasa (53,48 MW), utilizando resíduos florestais e localizada em Limeira – SP, e a Jari Celulose, do município de Almeirim – PA, com uso de licor negro.

A Figura 5.5 apresenta a distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 2, para a matriz de contiguidade “rainha”, para 2000, 2010 e 2019. O nível de licor negro apresentou resultados significativos para todo o período analisado. Em 2000, notou o padrão espacial AA, com as usinas da Suzano Mucuri, Cenibra e Aracruz, assim como notado para o nível 1 – floresta. Para o padrão BB esteve a CMPC – RS (47,00 MW) e a Klabin – PR (48,85 MW), usinas com pequeno potencial no ano de 2000. Para 2010, a Suzano Mucuri e Veracel, ambas na Bahia, e a Cenibra consituíram como localizações de alta (padrão AA). A entrada de usinas entre 2010 e 2019 dissolveu os clusters de alta potência, encontrados nos anos anteriores.



Legenda: ■ Alto - Alto ▼ Alto - Baixo ▲ Baixo - Alto ◆ Baixo - Baixo ● Não significativo

Figura 5.5. Distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas brasileiras da biomassa florestal, nível 2, para a matriz de contiguidade “rainha”, para 2000, 2010 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Em 2019, observou apenas uma usina para o padrão AA, a Fibria MS – MS, com 175,10 MW outorgados, com vizinhança com a Lwarcel (36,42 MW) e a Fibria MS II –

MS (269,58 MW). Para o padrão espacial BB esteve a Nobrecel – SP (3,20 MW) e de associação AB, com a usina CMPC – RS, que apresentou expansão tecnológica, alcançando 250,99 MW.

Para o nível de resíduos florestais foram encontrados padrões espaciais significativos em 2010 e 2019. Em 2010, identificou para o padrão AA, a usina de resíduos florestais PIE-RP – SP (27,80 MW) e para o nível BB estiveram as usinas Pampa – PA (0,55 MW), Primavera do Leste – MT (8,00 MW) e Fazenda Santa Marta (3,60 MW). Os *outliers* de baixa potência, ou seja, usinas de baixa potência outorgada, com vizinhança alta foram: a Gaseifamaz I – SP (0,03 MW), a Energia Madeira – SC (4,00 MW) e a Sguario Itapeva – SP (2,81 MW). O padrão espacial AB apresentou a térmica Rondon II – RO (24,00 MW), como destacado para o nível floresta.

Em 2019, observou-se padrão espacial AA para as termelétricas ERB Candeias – Bahia (16,79 MW), e CGVE Innova – RS (50,00 MW). Para a relação BB, observou-se 7 termelétricas, as observações foram semelhantes ao nível floresta, tendo em vista que a grande quantidade de usinas de resíduos florestais para potência outorgada da bioeletricidade florestal no Brasil. As usinas foram: Santo Antônio – PA (0,06 MW), Juruá Floresta - PA (0,40 MW), Pampa – PA (0,55 MW), Ebata (0,80 MW) e Tramontina (1,50 MW), indicando um polo de baixa oferta no estado do Pará; completaram as usinas: Egídio – MT (2,00 MW) e a Piratini – RS (10,00 MW).

Foram identificados *outliers* do tipo BA e AB. Para o padrão BA estiveram as termelétricas: Gaseifamaz – SP (0,03 MW), Laminados – AC (1,50 MW), Florevale – MG (2,52 MW), Rações Patense – MG (3,00 MW), Fazenda Santa Marta – MG (3,60 MW), Forespel – RS (3,70 MW), Lanxess Cogeração – SP (4,50 MW) e a Cargill – Três Lagoas (6,00 MW). Dentre as localizações BB e BA foi possível notar que, em geral, as usinas do sul do país apresentaram maior potencial outorgado médio para a bioeletricidade dos resíduos florestais. Para o AB estiveram a Floraplac – PA (20,00 MW), a Guaçu – MT (30,00 MW), a Granol – PO e a Cargill Uberlândia – MG (25,00 MW) outorgada, com as térmicas Madem – RS (1,00 MW), Iguaçu-Ibicuí-Termo-1-2-4 – RS (3,10 MW) e Cargill Três Lagoas – MS (6,00 MW).

Para o nível do gás de alto forno, em 2010, identificou-se um conglomerado de baixa, onde estiveram as usinas: Plantar – MG (5,00 MW), Calsete – MG (2,00MW), Siderpa - MG (2,4 MW), todas no município de Sete Lagoas, e a Metalsider - MG (8,8 MW). Houve domínio do estado de Minas Gerais sobre a oferta nacional a partir deste

recurso. Em 2019, as termelétricas Calsete, Siderpa e Plantar continuaram com o mesmo padrão espacial, sendo adicionada Siderúrgica Barão de Mauá – MG (1,20 MW) e a Usitar Eco – Energy – MA (2,40 MW).

Para o carvão vegetal, em 2010, identificou-se *outliers*, para configuração AB esteve a termelétrica Barreiro - MG (12,20 MW). Para o nível BA esteve a Cisam – MG (2,00MW), embora sob significância de 10%, os resultados para 2010 foram associadas apenas 5 termelétricas, o que pode ocasionar a observação de todo o universo amostral pela matriz de contiguidade rainha. Para 2019 houve um *cluster* de alta (AA) localizado no estado do Maranhão, participaram a Simasa – MA (8,00 MW), a Gusa Nordeste – MA (10,00 MW) e a Viena – MA (12,20 MW). Para o padrão espacial BB registrou-se a João Neiva - ES (3,50 MW). Não houve padrão espacial significativo para a potência outorgada da lenha.

5.4 CONCLUSÃO

A análise de conjuntura, por quartis, evidenciou os estados da porção centro-sul do Brasil como as principais localizações das térmicas florestais. Notou-se também o domínio das termelétricas do licor negro, evidenciado pelos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul, Bahia e Maranhão.

O I_{Moran_Global} destacou decréscimo do índice de autocorrelação espacial para a matriz de 2 vizinhos mais próximos, entre os anos de 2000 e 2019. A diminuição do efeito espacial, esteve associada a implementação de novas usinas termelétricas pelos grandes grupos Fibria, Klabin e Suzano Celulose em todo território nacional. Para o nível floresta os principais pontos de alavancagem estiveram no estado da Bahia, associado as usinas de licor negro. Para as fontes de nível dois, destacaram-se o Mato Grosso do Sul e São Paulo para os resíduos florestais e o estado de Minas Gerais, para o gás de alto forno.

O índice local (I_{Moran_Local}) evidenciou a existência de alguns *clusters* de alta capacidade outorgada, principalmente nos anos iniciais de análise, destacando o eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais e as térmicas do Paraná e Mato Grosso do Sul. O I_{Moran_Local} apontou *outliers*, que mostrou que embora tenham havido agrupamentos da oferta, a localização das usinas também está associada a outras atividades, como a produção madeireira e indústrias do segmento siderúrgico e de celulose e papel.

Para o nível 2, o licor negro apresentou um baixo número de *clusters*, todavia destacou-se o agrupamento das usinas Suzano Mucuri - BA, Aracruz - ES e Cenibra – MG, nos anos iniciais de análise; além do elevado número de observações da região Sul. O carvão vegetal demonstrou autocorrelação espacial negativa, com dois polos produtivos no país (MA e MG).

O conhecimento do padrão espacial do setor de bioeletricidade florestal, apresentado neste estudo, pode contribuir com os investidores e formuladores de políticas no auxílio de tomadas de decisão sobre a localização e a escala ideais da futura capacidade de bioeletricidade florestal.

5.5 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: fev. 2020.
- ALMEIDA, E. **Econometria espacial**. Campinas–SP. Alínea, 2012.
- ANSELIN, L. Spatial Externalities, Spatial Multipliers, and Spatial Econometrics. **International Regional Science Review**, v. 26, n. 2, p. 153-166, 2003.
- ANSELIN, L. **The Moran Scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association**. California: Santa Barbara, 1996. 23 p. (Research Paper, 9330).
- BHATNAGAR, R.; SOHAL, A. S. Supply chain competitiveness: measuring the impact of location factors, uncertainty and manufacturing practices. **Technovation**, v. 25, n. 5, p. 443–456, 2005.
- CABRAL, J. A.; LEGEY, L. F. L.; CABRAL, M. V. F. Electricity consumption forecasting in Brazil: A spatial econometrics approach. **Energy**, v. 126, p. 124-131, 2017.
- CESPRINI, E.; RESENTE, G.; CAUSIN, V.; URSO, T.; CAVALLI, R.; ZANETTI, M. Energy recovery of glued wood waste—A review. **Fuel**, v. 262, p. 116520, 2020.
- COELHO JUNIOR, M. L., MARTINS, K. L. C., PINTO, P. A. L. A.; SILVA, M. V. B. Spatial distribution of firewood production in northeastern Brazil (1994-2013). **Revista Árvore**, v. 42, n.4, p. e420402, 2018.
- CUENCA, G. M. A.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Rev. Econ. NE**, v. 47, n. 4, p. 91–106, 2016.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planautina, DF, EMBRAPA Cerrados, 2004. 209 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Séries Históricas**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION. **The state of the world's forests 2018**. [Online]. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/36c8539c-dc9c-4fae-ab8e-ee5c43d30a25/>. Acesso em: 05 nov. 2019.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; SKOG, K. Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern U.S. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 348–361, 2013.

GOODCHILD, M. The validity and usefulness of laws in geographic information Science and geography. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 94, n. 2, p.300-303, 2004.

HE, Y.; GUANG, F.; WANG, M. The efficiency of electricity-use of China and its influencing factors. **Energy**, v. 163, p. 258–269, 2018.

HUGOS, M. H. **Essentials of supply chain management**. New York: John Wiley & Sons. 2011.

HURON, M.; OUKALA, S.; LARDIÈRE, J.; GIRAUD, N.; DUPONT, C. An extensive characterization of various treated waste wood for assessment of suitability with combustion process. **Fuel**, v. 202, p. 118-128, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. [s.l: s.n.]. Brasília: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: jun. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: jul. 2019.

JING, N.; CAI, W. Analysis on the spatial distribution of logistics industry in the developed East Coast Area in China. **The Annals of Regional Science**, v. 45, n. 2, p. 331-350, 2010.

MARQUES, M. I. M. Considerações sobre a expansão da indústria de papel e celulose no Brasil a partir do caso da Suzano Papel e Celulose. **GEOgraphia**, v. 17, n. 35, p. 120-147, 2015.

MASHHOODI, B. Spatial dynamics of household energy consumption and local drivers in Randstad, Netherlands. **Applied Geography**, v. 91, p. 123–130, 2018.

PAN, J.; LI, J. Spatiotemporal Dynamics of Electricity Consumption in China. **Applied Spatial Analysis and Policy**, v. 12, n. 2, p. 395–422, 2019.

PEROBELLI, F. S.; ALMEIDA, E. S.; ALVIM, M. I. S. A.; FERREIRA, P. G. C. Produtividade do setor agrícola brasileiro (1991-2003): uma análise espacial. **Nova Economia**, v. 17, n. 1, p. 65–91, abr. 2007.

PEROBELLI, F. S.; OLIVEIRA, C. C. C. Energy development potential: An analysis of Brazil. **Energy Policy**, v. 59, p. 683–701, 2013.

ROCHA, A.; PEROBELLI, F. Spatial distribution of logistics services in Brazil: A potential market analysis. **Regional Science Policy & Practice**, v. 12, n. 1, p. 185–217, 2020.

SILVA, N. C. N.; OLIVEIRA, M. S.; SANTOS, G. R.; BRAGA, A. S.; Análise de dados de área aplicada a dois indicadores econômicos de mesorregiões do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 29, n.3, p. 369-395, 2011.

SILVA, R. R.; MATHIAS, F. R. DE C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. **Energy**, v. 153, p. 816–824, 2018.

TIAN, W.; SONG, J.; LI, Z. Spatial regression analysis of domestic energy in urban areas. **Energy**, v.76, p. 629-640, 2014.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234–40, 1970.

VALDETARO, E. B.; SILVA, F. L.; RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G. GONÇALVES, L. A. Contribuição dos créditos de carbono na viabilidade econômica dos contratos de fomento florestal no sul da Bahia. **Revista Árvore**, v. 35, n. 6, p. 1307–1317, 2011.

WANG, S.; SONG, J.; WANG, X. E.; WANG, W. The Spatial and Temporal Research on the Coupling and Coordinated Relationship between Social Economy and Energy Environment in the Belt and Road Initiatives. **Sustainability**, v. 11, n. 2, p. 407, 2019.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global Bioenergy Statistics 2018**. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/>. Acesso em: 15 de jul. 2019.

YADAV, S. K.; SINGH, S.; GUPTA, R. Measures of Location. *In: Biomedical Statistics*. Springer, Singapore, 2019. p. 53-58.

YANG, Y.; WONG, K. K. F. Spatial distribution of tourist flows to China's cities. **Tourism Geographies**, v. 15, n. 2, p. 338-363, 2013.

6 ARTIGO 5 – ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DOS CONGLOMERADOS DA BIOELETRICIDADE FLORESTAL NO BRASIL (2000 – 2019)

RESUMO

As usinas termelétricas da biomassa florestal são alternativas diante o crescimento da demanda de eletricidade, sendo utilizadas a partir da cogeração em indústrias de base florestal, o que pode resultar em um padrão de distribuição espacial associado a localização deste segmento. Este artigo analisou o efeito espaço-tempo dos conglomerados da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019. Os dados da outorga das termelétricas de biomassa florestal foram obtidos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para verificar a existência de *clusters* utilizou a estatística scan de permutação espaço temporal, para alto nível de conglomeração. A partir das análises realizadas, observou-se que a porção Centro-Sul do Brasil deteve o maior número de conglomerados para a bioeletricidade florestal, sendo o licor negro e os resíduos florestais os principais insumos destas usinas. Houver 6 *clusters* espaço temporal significativos para a oferta da biomassa florestal, além de 8 *clusters* isolados com contribuição temporal. A existência dos conglomerados esteve associada a regiões com elevada capacidade de produção da madeira e complexos do setor de papel e celulose. Destacou-se também algumas localidades como as intermediárias de Imperatriz - MA, Sinop – MT, Campo Grande - MS e Lages – SC. Este trabalho contribui para o desenvolvimento científico das análises espaciais e pode auxiliar estudos de viabilidade de implementação de empreendimentos de energia e/ou fomentar o desenvolvimento de políticas públicas, favorecendo a diversificação e complementariedade da matriz elétrica nacional e aumento de sua segurança energética.

Palavras-chave: Bioenergia, Estatística scan, Permutação espaço-tempo, Clusters.

**ARTICLE 5 - SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF FOREST BIOELECTRICITY
CONGLOMERATES IN BRAZIL (2000 - 2019)**

ABSTRACT

The thermoelectric plants of forest biomass are alternatives in view of the growing demand for electricity, being used from cogeneration in forest-based industries, which may result in a spatial distribution pattern associated with the location of this segment. This article analyzed the space-time effect of forest bioelectricity conglomerates in Brazil, from 2000 to 2019. Data on the granting of forest biomass thermoelectric plants were obtained from the National Electric Energy Agency (ANEEL). To verify the existence of clusters, the time space permutation scan statistic was used for a high level of conglomeration. From the analyzes carried out, he observed that the Center-South portion of Brazil held the largest number of conglomerates for forest bioelectricity, with black liquor and forest residues being the main inputs of these plants. There were 6 significant temporal space clusters for the supply of forest biomass, in addition to 8 isolated clusters with temporal contribution. The existence of conglomerates was associated with regions with high wood production capacity and complexes in the paper and cellulose sector. Also highlighted were some locations with a greater vocation for the development of this form of generation, such as the intermediaries of Imperatriz - MA, Sinop - MT, Campo Grande - MS and Lages - SC. This work contributes to the scientific development of spatial analyzes and can assist feasibility studies for the implementation of energy projects and / or promote the development of public policies, favoring the diversification and complementarity of the national electrical matrix and increasing its energy security.

Keywords: Bioenergy, Scan statistics, Space-time permutation, Clusters.

6.1 INTRODUÇÃO

O interesse na utilização da biomassa moderna para geração de energia tem aumentado nas últimas décadas, principalmente, por propiciar a redução da dependência dos combustíveis fósseis (NISHIGUCHI; TABATA, 2016). Acda e Devera (2014) destacaram o aspecto ambiental como fator que colabora com o desenvolvimento do recurso, para um processo de colheita sustentável, a geração de energia da biomassa é considerada neutra em carbono. A combustão direta de biomassa é viável para o fornecimento de calor e eletricidade as indústrias, residências e ao setor agropecuário (SAIDUR et al., 2011; KILPELÄINEN et al., 2016).

Segundo Nunes, Causer e Ciolkosz (2020) a biomassa pode ser obtida de florestas naturais (planos de manejo sustentável), florestas plantadas, de culturas agrícolas, produção de algas e da coleta de resíduos; existindo ainda os resíduos animais (pecuária) e urbanos. Os produtos finais incluem a geração de calor, eletricidade e/ou biocombustíveis (líquido, sólido ou gasoso). Dentre as formas, a biomassa florestal apresenta vantagens em seu uso, como a rápida recomposição de reservas, a possibilidade de uso de resíduos e a acessibilidade do processo de conversão (combustão), que pode utilizar tecnologias desenvolvidas para os recursos exauríveis (EVANS; STREZOV; EVANS, 2010).

Em 2018, a geração mundial de eletricidade foi de 26.730,07 TWh (Tera Watts hora), dos quais 19.803,98 TWh (74,09%) foram de recursos exauríveis e 6.926,09 TWh (25,91%) foram de fontes de energia renováveis (16,18% das hidroelétricas, 4,76% da eólica, 2,38% da biomassa e 2,59% de outras formas) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020). No Brasil, em 2018, a geração de eletricidade alcançou 658,99 TWh, com 79,94% das fontes renováveis, distribuídos em: 59,54% a partir de recursos hídricos, 12,01% da bioeletricidade, 7,35% da energia eólica, 0,5% da energia solar e 0,54% de outras renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019).

Jin e Sutherland (2018) ressaltaram que os sistemas de bioenergia florestal são importantes no desenvolvimento socioeconômico de regiões, todavia esses materiais ainda são subutilizados. A principal barreira ao uso da bioeletricidade florestal se encontra nos elevados custos de transporte e de matéria prima, o que faz com sua aplicação ocorra, principalmente, no processo de cogeração em indústrias de base florestal e resulte em um padrão de distribuição espacial associado à localização deste segmento (POKHAREL; GRALA; GREBNER, 2017). No Brasil, as principais termelétricas florestais estão

concentradas próximas aos grandes centros industriais siderúrgicos, de serrarias e do segmento de celulose e papel (SANTOS JÚNIOR, 2019).

O agrupamento espacial de atividades econômicas influencia diretamente o funcionamento de um mercado, gerando vantagens ou desvantagens econômicas (CAPELLO, 2015). Porter (2000) afirmou que a aglomeração de serviços ou de um grupo de empresas relacionadas, em uma cadeia de suprimentos, poderiam ser entendidos como *clusters*. Segundo o autor, um conglomerado envolve quatro aspectos principais: as empresas de um setor semelhante; as condições de fornecimento, a qual engloba todos os serviços necessários para o funcionamento do segmento; as condições de demanda e as indústrias relacionadas e de apoio (instituições governamentais e de ensino).

Porter (1998) destacou que a colaboração e a competição entre participantes em um *cluster* pode promover aumento da produtividade industrial, otimizar a direção e o ritmo da inovação e estimular a implementação de novos empreendimentos. De maneira geral, o estudo e a identificação de *clusters* podem contribuir para uma melhor compreensão da contemporaneidade de padrões, processos de transformação industrial, competitividade da indústria e desenvolvimento regional (HALLENCREUTZ; LUNDEQUIST, 2003).

A detecção de conglomerados pode ser realizada a partir de diversos métodos, os quais diferem-se pelas características e hipóteses feitas sobre o *cluster*. A estatística scan, desenvolvida por Kulldorff (1997) é utilizada para detectar áreas com elevada taxa de incidência de uma determinada atividade, a partir de uma razão de verossimilhança e utilizando uma varredura multidimensional. A abordagem da estatística scan (*scan statistic*) observa conglomerados em nível espacial, temporal e espaço temporal.

A estatística scan pode ser aplicada em diversas áreas do conhecimento, com ênfase nos estudos de saúde: Arroyo et al. (2017); Lieu et al. (2015) e Nigatu et al. (2019). No entanto, nas últimas décadas o método vem sendo aplicado em diversas áreas do conhecimento. Alguns autores que contribuíram com a multidisciplinaridade foram: Dai (2012), que avaliou áreas com elevado grau de lesões em acidentes veiculares na Geórgia – EUA; O’Loughlin e Witmer (2011), na avaliação de zonas com elevado índice de violência na Rússia; e Perchinunno, Mongelli e Rotondo (2020), para avaliação de qualidade ambiental na Itália. Para o setor florestal, destacaram-se Randolph (2017) que observou áreas de florestas mortas na Carolina de Sul – EUA e Shekede, Mupandira e Gwitira (2020) que usaram a estatística scan para avaliar os conglomerados espaço temporais de incêndios florestais, no Zimbábue, de 2000 a 2019. Outros trabalhos de destaque foram:

Desjardins, Hohl e Delmelle (2020), Han et al. (2016), Patil et al. (2006) e Stevenson et al. (2010).

Para compreender a distribuição espaço-temporal das termelétricas florestais e auxiliar o desenvolvimento de políticas públicas para o setor energético, este artigo analisou o efeito espaço-tempo dos conglomerados da bioeletricidade florestal no Brasil, de 2000 a 2019.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Objeto de estudo

As termelétricas de biomassa florestal estão disponíveis nos Sistema de Informações da Aneel (SIGA) da ANEEL, no período de 2000 a 2019. As usinas estão classificadas em nível 1 (biomassa florestal) e nível 2 (lenha, carvão vegetal, gás de alto forno, licor negro e resíduos florestais). As informações das outorgas dessas térmicas foram obtidas da biblioteca digital (Sophia) da ANEEL.

Utilizou-se da Taxa de crescimento geométrica (TGC), Equação 1, para observar as alterações (aumento e diminuição) na potência observada e esperada nos conglomerados espaço-temporais entre 2000 e 2019 (CUENCA; DOMPIERI, 2016).

$$TGC[\%] = \left[\sqrt{\frac{V_F}{V_0}} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

em que, V_F = potência outorgada ou esperada (MW) da biomassa florestal no ano final; V_0 = potência outorgada ou esperada (MW) do ano inicial; Δt = variação temporal (expressa em anos).

6.2.2 Estatística Scan

Utilizou-se de uma análise espaço-temporal para alta conglomeração, com base no modelo de permutação espaço-temporal e no método da máxima verossimilhança generalizada de Poisson. A estatística de varredura espaço-temporal pode ser compreendida por uma janela cilíndrica (A) com uma base geográfica circular, e com a altura correspondente ao tempo. A base é definida exatamente como que para a estatística de varredura puramente espacial, enquanto a altura reflete o período de tempo de potenciais aglomerados (KULLDORFF, 2015).

A principal distinção do modelo de permutação espaço-temporal, relacionado aos demais, encontra-se na ausência de dados de população, sendo possível a identificação de conglomerados a partir do número de casos e das coordenadas geográficas. O modelo de máximo verossimilhança generalizada foi apresentado por Kulldorff et al. (2005), onde o número de casos total observados (C) pode ser dado pela Equação 2.

$$C = \sum_z \sum_p c_{zp} \quad (2)$$

em que: c_{zp} é a potência outorgada observada de termelétricas de base florestal, na coordenada geográfica (z) durante um período temporal (p). Para cada coordenada e período, foi calculado potência outorgada total esperada (μ_{zp}) (Equação 3).

$$\mu_{zp} = \frac{1}{C} \left(\sum_z c_{zp} \right) \left(\sum_p c_{zp} \right) \quad (3)$$

Assim, a potência outorgada esperada (μ_A) em um determinado cilindro A é o somatório das demais localizações inseridas na janela cilíndrica (Equação 4).

$$\mu_A = \sum_{(z,p) \in A} \mu_{zp} \quad (4)$$

Para o cálculo do número esperado, tomou-se que a chance de encontrar uma termelétrica florestal no interior de z , foi a mesma para todo o período de análise. Kulldorff et al. (2005) afirmaram que para um pequeno número de casos espaciais e temporais, a distribuição de probabilidade de Poisson com média μ_A , também pode ser utilizada. Assim, a razão de verossimilhança generalizada de Poisson (RVG) foi obtida pela Equação 5. Foram avaliadas janelas espaciais circulares com 5,0%, 8,6% (participação da potência outorgada da biomassa na matriz elétrica brasileira), 20,0% e 30,0% dos geradores na região z serem da biomassa florestal. Por sua vez, a janela temporal foi ajustada a 50% do período de estudo, conforme sugerido por Kulldorff (2015).

$$RVG = \left(\frac{C_a}{\mu_A} \right) \left(\frac{C - C_a}{C - \mu_A} \right)^{(C - C_a)} \quad (5)$$

em que: C = quantidade total da potência outorgada da biomassa florestal, no período de 2000 a 2019, no Brasil; C_a = é a potência outorgada da biomassa florestal no cilindro A e μ_A = potência outorgada total esperada no cilindro A .

Para o cálculo do RGV maximizado (que indica o *cluster* com maior probabilidade de ser verdadeiro), além dos dados reais (R), foram gerados e ranqueados um conjunto de dados simulados (S) (999 permutações). A significância estatística foi avaliada a partir do teste de hipóteses de Monte Carlo, com nível de significância de 5% ($p \text{ valor} \leq 0,05$) (DWASS, 1957). Onde o $p \text{ valor}$ foi obtido pela Equação 6.

$$p\text{valor} = 1 - \frac{R}{(S + 1)} \quad (6)$$

Avaliaram-se as características dos *clusters* identificados, por meio do centroide do conglomerado, do raio R (km), do valor observado (Obs.), do valor esperado (Esp.), do período de tempo, do RVG e do $p \text{ valor}$. *Clusters* com raio nulo, ou seja, puramente temporais, foram adotados como *clusters* isolados.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6.1 apresenta os *clusters* das termoeletricas de base florestal no Brasil, entre 2000 a 2019, para a) 5,00%, b) 8,60%, c) 20,00% e d) 30,00% de probabilidade de os geradores de energia serem da biomassa florestal. Para o nível de 5,00% (Figura 6.1.a) foram observados 24 *clusters*, todavia apenas 11 foram agrupamentos apenas temporal (raio = 0 km). Dentre os 13 conglomerados, 5 foram centrados no Sul, 3 no Sudeste, 3 no Centro-Oeste, 1 no Nordeste e 1 na região Norte. O nível de 5,00% apresentou o maior detalhamento, todavia selecionou-se zonas com baixa potência, devido a pequena probabilidade associada.

Para 8,60%, Figura 6.1.b, observou-se 14 *clusters* da bioeletricidade florestal (6 espaços temporais e 8 temporais), sendo 5 localizados na porção sul do país e apenas um ao norte do território, 3 na região Sul, 1 no Sudeste e 2 no Centro-Oeste. Para a probabilidade de 8,60% foram identificados 6 *clusters* espaços temporais e 8 temporais. O nível de probabilidade de 20,00% (Figura 6.1.c) apresentou 9 conglomerados (5 espaços temporais e 4 temporais), cujos *clusters* apresentaram raio superior as demais observações, tendo em vista a janela probabilística de varredura. Os centroides das aglomerações estiveram divididos nas regiões: 2 na região Sul, 1 no Sudeste, 1 no Centro-Oeste, 1 no Norte. A Figura 1.d representa o último nível de probabilidade avaliado (30,00%), o comportamento foi semelhante ao de 20,00%. Foram 7 conglomerados (5 espaços

temporais e 2 temporais), os espaciais estiveram centrados nas regiões Sul (2), Sudeste (1), Centro-Oeste (1) e Nordeste (1).

Devido ao detalhamento obtido e a associação da janela probabilística com a participação da biomassa na matriz elétrica nacional, para as demais análises selecionou-se o nível de 8,60% (Figura 6.1.b). A Tabela 6.1 apresenta a caracterização dos *clusters* das termoelétricas de base florestal no Brasil, para entre 2000 e 2019. Todos os *clusters* apresentaram significância estatística com p valor $< 0,05$.

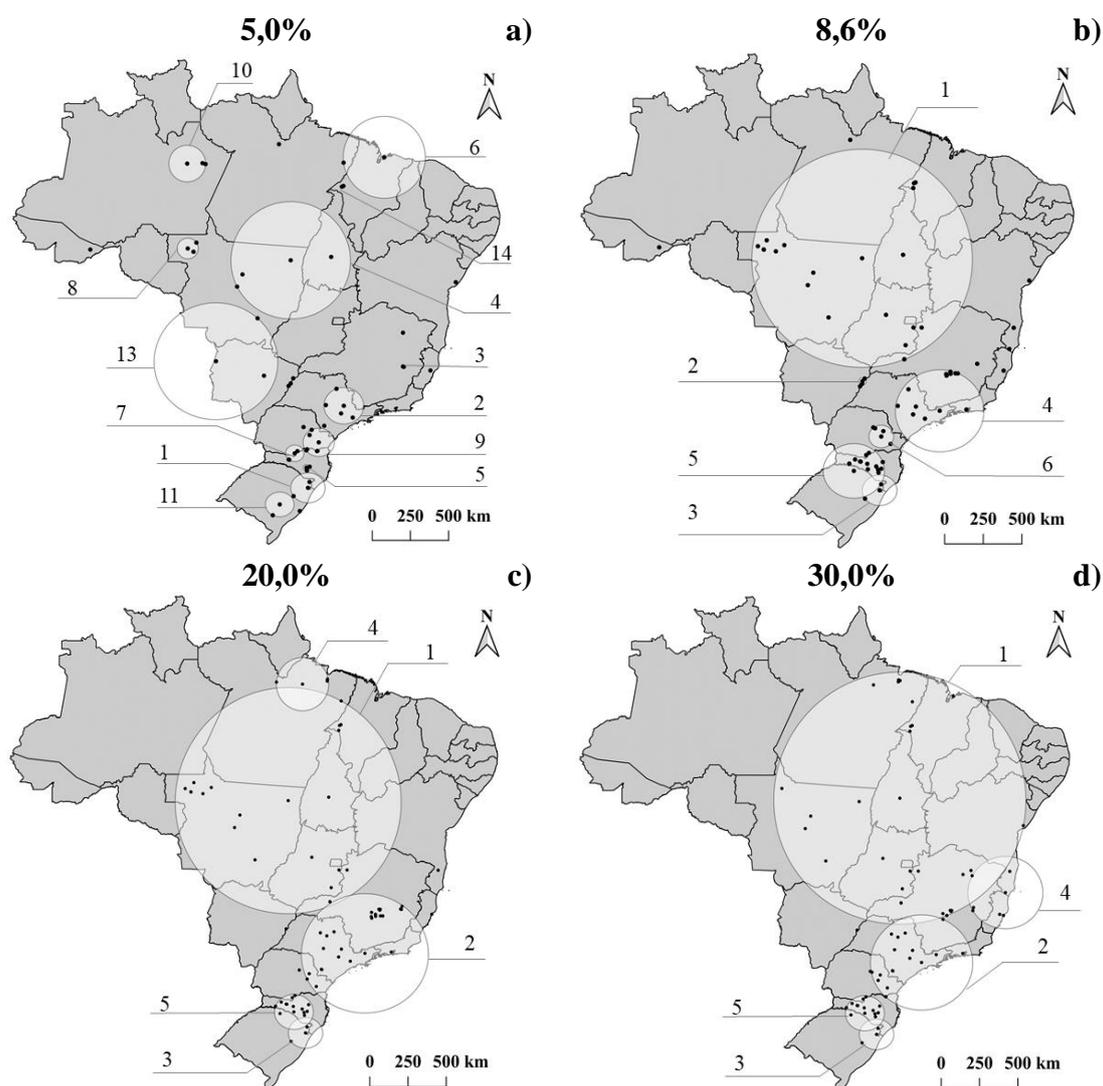


Figura 6.1. Clusters das termoelétricas de base florestal no Brasil, entre 2000 a 2019, para probabilidade de 5,0%, 8,6%, 20,0% e 30,0% dos geradores serem de base florestal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O *cluster 1*, esteve centrado em Porto Alegre do Norte - MT, com raio de 957,48 km e teste de verossimilhança generalizada (RVG) de 211.586,11. O período de validação estatística do conglomerado foi de 2012 a 2019; neste intervalo, a média de potência outorgada foi de 386,92 MW observados, contrapondo a 264,37 MW esperados pelo método. O estado com maior potência outorgada média no interior do *cluster* foi o Maranhão, 281,29 MW, com destaque para a Suzano Maranhão (MA), com 254,84 MW outorgados, que utilizou do licor negro.

O *cluster 2* apresentou centroide em Três Lagoas – MS e janela temporal de estudo (2011 a 2019). Embora a área do *cluster* englobe os estados do Mato Grosso do Sul e São Paulo, as usinas participantes estiveram apenas no MS, todas situadas na região intermediária de Campo Grande – MS, a qual compõe o Bolsão Sul-Mato-grossense, região ligada aos estados de São Paulo e Paraná, o que pode indicar transbordamento tecnológico entre as áreas.

Tabela 6.1. Caracterização dos clusters das termelétricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.

C.	Centroide	R (km)	RVG	Obs.Méd.	Esp.Méd.	Período	p-valor
1	Porto Alegre do Norte - MT	957,48	211.586,11	386,92	264,37	2012-2019	< 0,001
2	Três Lagoas – MS	30,60	154.784,35	252,23	171,82	2011-2019	< 0,001
3	Cambará do Sul – RS	134,23	124.508,28	68,70	12,21	2018-2019	< 0,001
4	Pindamonhangaba – SP	360,24	106.219,37	119,91	74,66	2002-2010	< 0,001
5	Erechim – RS	239,66	63.438,13	119,66	83,50	2002-2010	< 0,001
6	Carambeí - PR	98,74	51.839,53	140,00	88,31	2007-2010	< 0,001

Legenda: C.= Centroide; R = raio; RVG = razão de verossimilhança generalizada; Obs.Méd. = potência observada média durante o período de existência do cluster; Esp Méd. = potência esperada média durante o período de existência do cluster.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O conglomerado 3 foi centrado em Cambará do Sul – RS e contou com média de 68,70 MW outorgados (2018 e 2019), foram apenas 3 usinas participantes, todas com funcionamento a partir dos resíduos florestais (Cambará, CGVE Inova e a Forespel). O *cluster 4* englobou os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, e apresentou significância estatística entre 2002 e 2010. Com centroide localizado em Pindamonhangaba – SP, o conglomerado apresentou termelétricas dos resíduos florestais, licor negro, carvão vegetal e gás de alto forno (GAF). A usina com maior potência no interior do *cluster* foi a Ripasa, localizada em Limeira - SP, que apresentou média de 42,79

MW outorgados (2002 a 2010). Para o estado de Minas Gerais destacaram as térmicas do carvão vegetal (Barreiro e Cisam) e GAF (Siderúrgica União e Metalsider), resultante do polo siderúrgico estadual. Silva, Mathias e Bajay (2018) indicaram que o setor siderúrgico brasileiro apresenta perspectivas para aumento da autoprodução de eletricidade, sendo indicativo de crescimento para o gás de alto forno e carvão vegetal na matriz elétrica nacional.

Com centroide em Erechim - RS, o *cluster* 5, apresentou raio de 239,66 km, RVG de 63.438,13 e ocorreu entre 2002 e 2010. No período de existência estatística do conglomerado foram identificadas 10 termelétricas; dentre os recursos, estiveram os resíduos florestais, licor negro e lenha. O conglomerado 6, centrado em Carambeí – PR, teve raio de 98,74 e RVG de 51.839,53, contou com 4 usinas, todas no estado do Paraná.

A conglomeração na região Sul do país encontra associação com a elevada produção de florestas plantadas e a consequente existência de serrarias e indústrias de papel da região. Broughel (2019) destacou que além de políticas públicas, a consolidação do setor de papel e celulose é indispensável para utilização da biomassa florestal para geração de energia. A evolução temporal da potência outorgada (MW), observada e esperada, no exterior (Pot._{Ext.}) e no interior (Pot._{Int.}) dos *clusters* das termelétricas de base florestal no Brasil é apresentada na Figura 6.2.

Sob a região do *cluster* 1, Figura 6.2.a, entre os anos de 2000 e 2011, a potência outorgada média foi 22,20 MW. Em 2012, com a outorga das térmicas Suzano Maranhão – MA (254,84 MW) e Guaçu – MT (30,00 MW), a região tornou-se um *cluster* estatístico, com média de 386,92 MW, enquanto a potência esperada média foi de 264,37 MW (2012 – 2019). Durante a existência do conglomerado a capacidade disponível partiu de 354,94 MW (2012) para 458,89 MW (2019), indicando aumento médio de 3,74% a.a.; após 2012, destacaram-se a entrada das usinas: F&S Solutions (18,00 MW), em 2016, e a Inpasa – MT (42,30 MW), em 2019.

Para região do *cluster* 1 destacaram-se as regiões geográficas intermediárias de Sinop – MT, com 6 termelétricas, e Imperatriz – MA, com 2 termelétricas. Angelo, Silva e Silva (2004) destacaram elevado desempenho das indústrias da madeira na região de Sinop – MT, enquanto Souza e Pietrafesa (2019) apontaram elevado crescimento econômico para a região maranhense, a partir de 2012, constatando o desenvolvimento local e regional, proporcionado pelas indústrias do segmento florestal.

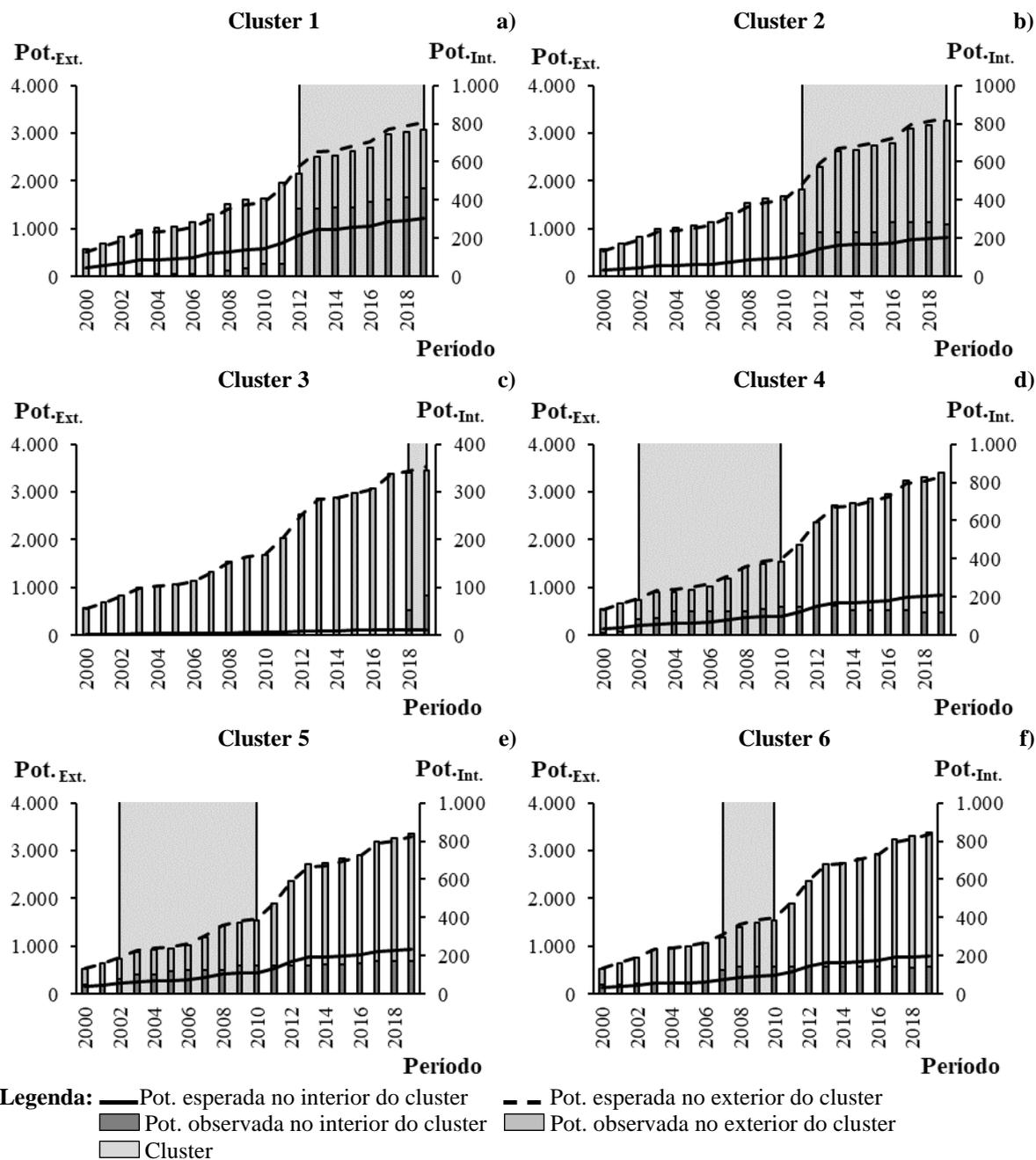


Figura 6.2 Evolução da potência outorgada (MegaWatts - MW), observada e esperada, no exterior (Pot.Ext.) e no interior (Pot.Int.) dos clusters das termoeletricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O *cluster 2*, Figura 6.2.b, existiu entre 2011 e 2019, com média de potência observada de 252,23 MW outorgados e 171,82 MW esperados. Em 2011 a potência no interior do *cluster* foi de 226,00 MW passando a 270,10 MW, em 2019. A existência desse *cluster* pode ser atribuída, principalmente, a usina de licor negro, Eldorado Celulose

(226,00 MW), localizada no município de Três Lagoas - MS. As outras usinas participantes foram a Cargill – Três Lagoas, com 6,00 MW (2012 – 2019) e Onça Pintada, com 50,00 MW (2016 – 2019). Embora o *cluster 2* ainda seja registrado, a análise da estatística scan indicou perspectivas de crescimento de 7,09% a.a. (2011 a 2019) para potência esperada, enquanto o aumento foi de apenas 2,25% a.a., no mesmo período, o que pode resultar em exclusão estatística do conglomerado nos próximos anos, caso não haja novas outorgas para região.

O terceiro conglomerado (Figura 6.2.c), iniciou em 2018, com a outorga das termelétricas Cambará – RS (50,00 MW) e Forespel - RS (3,70 MW), em 2018, e da Cgve Innova - RS (30,00 MW), em 2019; todas as usinas foram para resíduos florestais. A potência média no interior do *cluster* foi de 68,70 MW, contrapondo o esperado de 12,21 MW.

A região geográfica do *cluster 4*, Figura 6.2.d, apresentou potência outorgada durante todo período de estudo, contudo, a partir de 2002, tomou relevância estatística espaço temporal. O conglomerado foi iniciado em virtude da expansão da termelétrica Ripasa – SP, que teve aumento de 15,00 MW para 49,63 MW em sua capacidade outorgada. As usinas do conglomerado registraram crescimento médio de 6,42% a.a. (2002 a 2010) da oferta no interior do *cluster*; todavia, a implementação das grandes usinas do licor negro, a partir de 2012, além do fechamento das usinas PIE RP (30,00 MW), em 2013, e Barreiro (12,90 MW), em 2017, resultou no final da significância temporal.

O *cluster 5*, Figura 6.2.e, ocorreu entre 2002 e 2010. A potência outorgada cresceu de 80,75 MW (2002) para 150,97 MW (2010), taxa média de 7,20% a.a.. A potência no interior do conglomerado foi de 119,66 MW outorgados (2002 – 2010), contraposta a esperada de 83,49 MW. Assim como para o cluster 4, o aumento da potência outorgada no exterior, resultou na dissolução do conglomerado. As usinas estiveram nos estados do Paraná (Pizzato e Miguel Forte) e Santa Catarina (Chapecó, Irani, Celulose Irani, Bragagnolo, Thermoazul, Klabin Correia Pinto, Klabin Otacílio Costa, Lages e Rohden). Destacou as intermediárias de Curitiba - PR (2 termelétricas) Chapecó – SC (3 termelétricas) e Lages – SC (3 termelétricas). Segundo Furtado et al. (2012) a região tem sua economia firmada na indústria de base florestal e desde o início da década de 2000 tem aumentado a utilização dos resíduos em sistemas de cogeração, destacando casca de *Pinus*, cavaco com casca de *Pinus*, serragem, cavaco seco de *Pinus* e cavaco florestal.

O último agrupamento (Figura 6.2.f) adquiriu característica espaço temporal a partir de 2007, com a entrada a expansão tecnológica da termelétrica Klabin, que passou de 48,85 MW (2006) para 113,25 MW (2007) outorgados. Participaram do conglomerado as usinas Energy Green, Rickli, Piraí, Klabin e Berneck, todas localizadas no Paraná. De 2007 a 2010 a média de potência outorgada no interior do conglomerado foi 140,00 MW, com crescimento de 3,18% a.a., contra 6,72% a.a. fora da região, para o mesmo período, o que resultou no fim da relevância estatística.

A Tabela 6.2 apresenta a caracterização de *clusters* isolados das termoelétricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019. Das oito termelétricas destacadas, seis foram para o licor negro (Fibria MS – II, Klabin Celulose, Cenibra, Veracel, Jari Celulose, Bahia Pulp e Suzano Mucuri), uma para os resíduos florestais (Triunfo) e uma para o carvão vegetal (João Neiva). A Klabin Celulose (330,00 MW) foi a maior usina de biomassa florestal do Brasil, localizada em Ortigueira – PR, esteve ao redor do *cluster 6*, o que destacou a elevada capacidade para oferta de bioeletricidade florestal do Sul do país.

Tabela 6.2. Caracterização de clusters isolados das termoelétricas de base florestal no Brasil, entre 2000 e 2019.

C.	Termelétrica	Município	RVG	Obs.Méd.	Esp.Méd.	Período	<i>p-valor</i>
1	Fibria – MS II	Três Lagoas - MS	486.909,02	269.580,00	71.110,79	2017-2019	< 0,001
2	Klabin Celulose	Ortigueira - PR	327.648,46	330.000,00	186.411,81	2013-2019	< 0,001
3	Cenibra	Belo Oriente - MG	167.727,27	100.000,00	48.658,05	2000-2007	< 0,001
3	Veracel	Eunápolis - BA	128.345,16	121.822,50	69.882,34	2003-2010	< 0,001
4	Jari Celulose	Almeirim - PA	91.706,31	55.000,00	26.761,93	2000-2007	< 0,001
5	Bahia Pulp	Camaçari - BA	67.399,03	108.600,00	63.262,77	2007-2011	< 0,001
6	Suzano Mucuri	Mucuri – BA	37.517,02	92.000,00	52.059,60	2000-2002	< 0,001
7	Triunfo	Rio Branco - AC	35.093,90	28.970,00	14.251,90	2014-2019	< 0,001
8	João Neiva	João Neiva - ES	4.229,26	3.500,00	1.721,84	2014-2019	< 0,001

Legenda: Obs.= Observações significativas; R = raio; RVG = razão de verossimilhança generalizada; Obs.Méd. = potência observada média durante o período de existência do cluster; Esp.Méd. = potência esperada média durante o período de existência do cluster.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Almeida, Silva e Angelo (2012) destacaram que a madeira para celulose é mais valorizada dentro da região de atuação da Klabin, o que torna a área propícia ao desenvolvimento de um polo do segmento madeireiro e conseqüentemente uma zona com elevado potencial para oferta de bioeletricidade florestal.

A Fibria MS II (269,58 MW), embora não tenha sido apresentada pelo *cluster 2*, esteve localizada em Três Lagoas – MS, o que evidenciou a existência de um grande polo

industrial na região. A Cenibra (100,00 MW), localizada em Belo Oriente – MG, apresentou como uma das principais empresas nos anos iniciais (2000 a 2007). A termelétrica João Neiva, com 3,50 MW outorgados, apresentou relevância entre 2014 e 2019, utilizando o carvão vegetal, comum no estado mineiro devido a elevada quantidade de indústrias do setor siderúrgico.

No Nordeste, destacou a Veracel (121.823 MW), Bahia Pulp (108,60 MW) e a Suzano Mucuri (92,00 MW), todas outorgadas na Bahia, e com maior impacto nos anos iniciais de análise. Marques (2015) destacou a Bahia e o Mato Grosso do Sul como os principais estados para o setor de papel e celulose fora do eixo Sul – Sudeste. Cabe destacar que o uso da estatística scan com níveis de probabilidade acima de 30,00% (Figura 1.d) podem destacar o complexo baiano como uma *cluster* espaço-temporal significativo. Na região Norte estiveram a Jari Celulose (55,00 MW), do grupo Jari Celulose Papel e Embalagens S.A., e a usina Triunfo (28,97 MW) utilizando os resíduos florestais.

6.4 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, observou-se que a região Centro-Sul do Brasil deteve o maior número de *clusters* para a oferta da bioeletricidade florestal, para todos os níveis de janelas circulares testados. Dentre as fontes nível 2, foram os principais insumos: o licor negro e os resíduos florestais.

Para janela geográfica associada a 8,60% dos geradores serem da biomassa florestal, houver 6 *clusters* espaço-temporal significativos, além de 8 *clusters* isolados com contribuição temporal. A existência dos conglomerados esteve associada a regiões com elevada capacidade de produção da madeira e complexos do setor de celulose e papel. Observou-se que, a partir de 2012, a outorga de grandes usinas, principalmente do grupo Suzano Celulose e Klabin S.A., resultou no desenvolvimento estatístico de *clusters* espaço-temporais. Destacou-se também algumas localidades com maior vocação para o desenvolvimento dessa forma de geração, como as mesorregiões de Imperatriz - MA, Sinop – MT, Campo Grande - MS e Lages – SC.

Este trabalho auxilia o desenvolvimento científico das análises espaciais da bioeletricidade florestal. De forma geral, o estudo identificou os centros de oferta da bioeletricidade florestal, destacando as termelétricas que utilizam a cogeração,

aumentando sua eficiência energética, a partir da auto produção de eletricidade e melhor alocação de resíduos industriais. Esta pesquisa pode auxiliar estudos de viabilidade de implementação de empreendimentos de energia e/ou fomentar o desenvolvimento de políticas públicas, focadas nas regiões de *clusters*, favorecendo a diversificação e complementariedade da matriz elétrica nacional e o aumento de sua segurança energética.

6.5 REFERÊNCIAS

ACDA, M. N.; DEVERA, E. E. Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 4, p. 589–595, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 02 nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: fev. 2020.

ALMEIDA, A. N. DE; SILVA, J. C. G. L. DA; ANGELO, H. Influência da Klabin no mercado de madeira em tora do estado do Paraná. **CERNE**, v. 18, n. 1, p. 153–158, mar. 2012.

ANGELO, H.; SILVA, G. F. DA; SILVA, V. S. M. E. Análise econômica da indústria de madeiras tropicais: o caso do pólo de Sinop, MT. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 91, 2004.

ARROYO, L. H.; YAMAMURA, M.; PROTTI-ZANATA, S. T.; FUSCO, A. P. B.; PALHA, P. F.; RAMOS, A. C. V.; UCHOA, S. A.; ARCÊNCIO, R. A. Identificação de áreas de risco para a transmissão da tuberculose no município de São Carlos, São Paulo, 2008 a 2013. **Epidemiologia e serviços de saúde: revista do Sistema Unico de Saúde do Brasil**, v. 26, n. 3, p. 525–534, 2017.

BROUGHEL, A. E. Impact of state policies on generating capacity for production of electricity and combined heat and power from forest biomass in the United States. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1163–1172, 2019.

CAPELLO, R. **Regional economics**. [s.l.] Routledge, 2015.

CUENCA, G. M. A.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Rev. Econ. NE**, v. 47, n. 4, p. 91–106, 2016.

DAI, D. Identifying clusters and risk factors of injuries in pedestrian–vehicle crashes in a GIS environment. **Journal of Transport Geography**, v. 24, p. 206–214, 2012.

DESJARDINS, M. R.; HOHL, A.; DELMELLE, E. M. Rapid surveillance of COVID-19 in the United States using a prospective space-time scan statistic: Detecting and evaluating emerging clusters. **Applied Geography**, v. 118, p. 102202, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Brazilian Energy Balance 2019 Year 2018. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, p. 303, 2019.

EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 5, p. 1419–1427, 2010.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, 2012.

HALLENCREUTZ, D.; LUNDEQUIST, P. Spatial Clustering and the Potential for Policy Practice: Experiences from Cluster-building Processes in Sweden. **European Planning Studies**, v. 11, n. 5, p. 533–547, 2003.

HAN, J.; ZHU, L.; KULLDORFF, M.; HOSTOVICH, S.; STINCHCOMB, D. G.; TAALOVICH, Z.; LEWIS, R.; FEUER, E; J. Using Gini coefficient to determining optimal cluster reporting sizes for spatial scan statistics. **International Journal of Health Geographics**, v. 15, n. 1, p. 27, 3 dez. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: jul. 2020.

JIN, E.; SUTHERLAND, J. W. An integrated sustainability model for a bioenergy system: Forest residues for electricity generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 10–21, 2018.

KILPELÄINEN, A.; ALAM, A.; TORSSONEN, P.; RUUSUVUORI, H.; KELLOMÄKO; PELTOLA, H. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilisation from final felling of Norway spruce. **Biomass and Bioenergy**, v. 87, p. 1–8, 2016.

KULLDORFF, M. A spatial scan statistic. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v. 26, n. 6, p. 1481–1496, 1997.

KULLDORFF, M.; HEFFERNAN, R.; HARTMAN, J.; ASSUNÇÃO, R.; MOSTASHARI, F. A Space–Time Permutation Scan Statistic for Disease Outbreak Detection. **PLoS Medicine**, v. 2, n. 3, p. e59, 2005.

KULLDORFF, M. **SaTScan™ user guide for version 9.4**, 2015.

LIEU, T. A.; RAY, G. T.; KLEIN, N. P.; CHUNG, C.; KULLDORFF, M. Geographic Clusters in Underimmunization and Vaccine Refusal. **Pediatrics**, v. 135, n. 2, p. 280–289, 2015.

NIGATU, A. M.; GELAYE, K. A.; DEGEFIE, D. T.; BIRHANU, A. Y. Spatial variations of women's home delivery after antenatal care visits at lay Gayint District, Northwest Ethiopia. **BMC Public Health**, v. 19, n. 1, p. 677, 3 dez. 2019.

NISHIGUCHI, S.; TABATA, T. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1279–1286, 2016.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, n. April 2019, p. 109658, 2020.

O'LOUGHLIN, J.; WITMER, F. D. W. The Localized Geographies of Violence in the North Caucasus of Russia, 1999–2007. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 101, n. 1, p. 178–201, 2011.

PATIL, G. P.; MODARRES, R.; PATANKAR, P. Spatially constrained clustering and upper level set scan hotspot detection in surveillance geoinformatics. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 13, n. 4, p. 365–377, 2006.

PERCHINUNNO, P.; MONGELLI, L.; ROTONDO, F. A multidimensional approach for the identification of environmental and health wellness territories. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105911, mar. 2020.

POKHAREL, R.; GRALA, R. K.; GREBNER, D. L. Woody residue utilization for bioenergy by primary forest products manufacturers: An exploratory analysis. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 161-171, 2017.

PORTER, M. E. Clusters and the new economics of competition. **Harvard Business Review**, v.76, n. 6, p. 77-90, 1998.

PORTER, M. E. Location, Competition, and Economic Development: Local Clusters in a Global Economy. **Economic Development Quarterly**, v. 14, n. 1, p. 15–34, 25 fev. 2000.

RANDOLPH, K. D. Using satscan spatial-scan software with national forest inventory data: A case study in South Carolina. **Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences**, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2017.

SAIDUR, R.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, 2011.

SANTOS JÚNIOR, E. P. **Concentração e distribuição espacial da oferta brasileira de bioeletricidade florestal - 1º Lugar - Categoria: Graduação**, 2019.

SHEKEDE, M. D.; MUPANDIRA, I.; GWITIRA, I. Spatio-temporal clustering of active wildfire pixels over a 19-year period in a southern African savanna ecosystem of Zimbabwe. **South African Geographical Journal**, p. 1–20, 2 jul. 2020.

SILVA, R. R.; MATHIAS, F. R. DE C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. **Energy**, v. 153, p. 816–824, 2018.

SOUZA, J. R. F. DE; PIETRAFESA, P. A. A nova indústria do sudoeste maranhense: impactos socioeconômicos na cidade de Imperatriz – MA. **Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 9, n. 9, p. 143–155, 2019.

STEVENSON, J. R.; EMRICH, C. T.; MITCHELL, J. T.; CUTTER, S. L. Using Building Permits to Monitor Disaster Recovery: A Spatio-Temporal Case Study of Coastal Mississippi Following Hurricane Katrina. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 37, n. 1, p. 57–68, jan. 2010.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado apresentou a importância da biomassa florestal na oferta de eletricidade no Brasil, a qual demonstrou grande crescimento nas duas últimas décadas (2000 a 2019). Após as análises chegou as seguintes considerações finais:

Com base no primeiro artigo foi possível observar a literatura associada ao uso da biomassa florestal para geração de energia no mundo, com ênfase nas análises espaciais da bioeletricidade florestal. Os resultados forneceram uma visão sobre a evolução das pesquisas na área, indicando lacunas para o desenvolvimento de novos estudos. As análises espaciais da bioeletricidade florestal apresentaram um maior desenvolvimento a partir do ano de 2010. As principais contribuições foram para fornecimento de recurso para geração de eletricidade em termelétricas nos Estados Unidos, Áustria e Canadá. Com base neste levantamento notou-se a lacuna para estudos na área no território brasileiro.

Do segundo artigo destacou alta localização para a oferta a partir do licor negro (Sul, Bahia, Maranhão, Pará e Mato Grosso do Sul) e de resíduos florestais, em diversos estados, com destaque para a região Norte e Sudeste. Para a concentração em nível estadual, os índices $CR(4)$ e $CR(8)$ apontaram média de concentração moderadamente alta, com diminuição no período analisado e o HHI apontou baixa concentração, indicando distribuição atomizada. Destacaram como principais estados o Paraná, Bahia, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Dentre as firmas observou-se destaque das termelétricas de licor negro, sendo a Aracruz e Suzano Mucuri (2000 a 2012) e a Klabin Celulose a partir de 2013. O ingresso de novas térmicas resultou um cenário de baixa concentração para o $CR(4)$, $CR(8)$ e HHI ; o H e G indicaram um leve aumento na desigualdade. Este estudo possibilitou o entendimento da disponibilidade brasileira de bioeletricidade florestal e de sua organização mercado.

No terceiro artigo observou aumento na polarização entre os estados e as termelétricas para a biomassa florestal, com ênfase no crescimento da bipolarização. Entre as fontes de nível 2, notou o domínio do licor negro e dos resíduos florestais sobre a oferta nacional, acarretando a existência de polos na oferta.

O quarto artigo apontou diminuição da autocorrelação espacial para a potência outorgada da bioeletricidade florestal de 2000 a 2019. Para o nível floresta os principais pontos de alavancagem estiveram no estado da Bahia, associado as usinas de licor negro. Para as fontes de nível 2, o carvão vegetal apresentou os maiores valores para o índice,

com elevada autocorrelação espacial negativa, em 2010 e positiva, em 2019. Destacou-se também o gás de alto forno, com I_{Moran_Global} positivo e com pontos de alavancagem no estado de Minas Gerais. Da análise local notou a existência de algumas regiões de alta potência, principalmente, destacando: o eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, as térmicas do Paraná e as do Mato Grosso do Sul.

O último artigo apresentou a evolução dos *clusters* espaço temporal da bioeletricidade no Brasil. Foram identificados 6 *clusters* espaço-temporal significativos, além de 8 *clusters* isolados com contribuição temporal. A existência dos conglomerados esteve associada a regiões com elevada capacidade de produção da madeira e complexos do setor de celulose e papel.

De maneira geral, esta dissertação pode auxiliar o desenvolvimento científico das análises espaciais da bioeletricidade florestal, identificando os centros de oferta da bioeletricidade florestal e destacando as termelétricas que utilizam da cogeração. Esta pesquisa pode auxiliar estudos de viabilidade de implementação de empreendimentos de energia e contribui com os investidores e formuladores de políticas, a partir do destaque das regiões e polos industriais com maior desenvolvimento da bioeletricidade florestal. Assim, será possível obter melhores tomadas de decisão sobre a localização de futuras instalações, auxiliando na diversificação da matriz elétrica nacional e favorecendo o aumento da segurança e eficiência energética do Brasil.

8 REFERÊNCIAS

ACDA, M. N.; DEVERA, E. E. Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 4, p. 589–595, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 02 nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: fev. 2020.

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; DAY, K. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 117–127, 2014.

ALMEIDA, A. N. DE; SILVA, J. C. G. L. DA; ANGELO, H. Influência da Klabin no mercado de madeira em tora do estado do Paraná. **CERNE**, v. 18, n. 1, p. 153–158, mar. 2012.

ALMEIDA, E. **Econometria espacial**. Campinas–SP. Alínea, 2012.

ALONSO, W. **Location and land use**. Toward a general theory of land rent. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Pr. 1964.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S. **BNDES 50 Anos - Histórias Setoriais: O Setor Siderúrgico**. 2003.

ANGELO, H.; SILVA, G. F. DA; SILVA, V. S. M. E. Análise econômica da indústria de madeiras tropicais: o caso do pólo de Sinop, MT. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 91, 2004.

ANSELIN, L. **Spacestat tutorial: A workbook for using Spacestat in the analysis of spatial data**. Urbana Illinois, 1992.

ANSELIN, L. **Spatial Econometrics: methods and models**. Boston: Kluwer Academic, 1988.

ANSELIN, L. Spatial Externalities, Spatial Multipliers, and Spatial Econometrics. **International Regional Science Review**, v. 26, n. 2, p. 153-166, 2003.

ANSELIN, L. **The Moran Scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association**. California: Santa Barbara, 1996.

ARROYO, L. H.; YAMAMURA, M.; PROTTI-ZANATA, S. T.; FUSCO, A. P. B.; PALHA, P. F.; RAMOS, A. C. V.; UCHOA, S. A.; ARCÊNCIO, R. A. Identificação de áreas de risco para a transmissão da tuberculose no município de São Carlos, São Paulo,

2008 a 2013. **Epidemiologia e serviços de saúde : revista do Sistema Unico de Saúde do Brasil**, v. 26, n. 3, p. 525–534, 2017.

ARUGA, K.; MURAKAMI, A.; NAKAHATA, C.; YAMAGUCHI, R.; YOSHIOKA, T. Discussion on economic and energy balances of forest biomass utilization for small-scale power generation in Kanuma, Tochigi Prefecture, Japan. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 32, n. 2, p. 571–586, 2011.

BAIN, J. **Industrial organization**. New York: J. Wiley, 1959. 274 p.

BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 479–492, 2003.

BALIEIRO, A. A. S. **Detecção de conglomerados dos alertas de desmatamento do Amazonas usando Estatística de varredura espaço-temporal**. 2008. 87f. Dissertação (mestrado em Estatística Aplicada e Biometria). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2008.

BAXTER, L. L.; MILES, T. R.; MILES JR., T. R.; JENKINS, B. M.; MILNE, T.; DAYTON, D. BRYERS, R. W.; ODEN, L. L. The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: Field and laboratory experiences. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1–3, p. 47–78, 1998.

BEZERRA, M. C. C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, 2020.

BHATNAGAR, R.; SOHAL, A. S. Supply chain competitiveness: measuring the impact of location factors, uncertainty and manufacturing practices. **Technovation**, v. 25, n. 5, p. 443–456, 2005.

BILLINGS, S. B.; JOHNSON, E. B. The location quotient as an estimator of industrial concentration. **Regional Science and Urban Economics**, v. 42, n. 4, p. 642–647, 2012.

BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E. P.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365–2378, 2018.

BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 557–577, 2010.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, n. 2–3, p. 87–102, 2003.

BRIDGWATER, A. V.; TOFT, A. J.; BRAMMER, J. G. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 3, p. 181–246, 2002.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

BROUGHEL, A. E. Impact of state policies on generating capacity for production of electricity and combined heat and power from forest biomass in the United States. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1163-1172, 2019.

BROWN, R. R. Biomass Conversion Processes For Energy Recovery. *In*: GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F. (Ed.). **Handbook of energy efficiency and renewable energy**. CRC Press, 2007.

BRYAN, B. A.; WARD, J.; HOBBS, T. An assessment of the economic and environmental potential of biomass production in an agricultural region. **Land Use Policy**, v. 25, n. 4, p. 533–549, 2008.

BRYERS, R. W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 22, n. 1, p. 29–120, 1996.

BRZEZINSKI, M. Income polarization and economic growth. **National Bank of Poland working paper**, n.147, p. 1 – 38, 2013.

BURTLESS, G. The progress and distribution of US living standards, 1959–1995. **The North American Journal of Economics and Finance**, v. 8, n. 2, p. 111-133, 1997.

BUSU, M. A Market Concentration Analysis of the Biomass Sector in Romania. **Resources**, v. 9, n. 6, p. 64, 29 maio 2020.

CABRAL, J. A.; LEGEY, L. F. L.; CABRAL, M. V. F. Electricity consumption forecasting in Brazil: A spatial econometrics approach. **Energy**, v. 126, p. 124-131, 2017.

CAMBERO, C.; SOWLATI, T. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 62–73, 2014.

CAMBERO, C.; SOWLATI, T.; MARINESCU, M.; ROSER, D. Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 4, p. 439–452, 25 mar. 2015.

CAPELLO, R. **Regional economics**. [s.l.] Routledge, 2015.

CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, n. 2019, p. 741–753, 2019.

CARVALHO, D. J.; VEIGA, J. P. S.; BIZZO, W. A. Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation. **Energy**, v. 119, p.178–187, 2017.

CARVALHO, R. L.; DE ASSIS, P. C. L. **Coque Verde de Petróleo: Uma visão geral sobre qualidade, produção no Brasil e exterior e suas aplicações.** PETROBRAS SA. 2007.

CARVALHO, R.M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 105-118, 2005.

CAVALCANTE, L. R. Produção teórica em economia regional: uma proposta de sistematização. **Revista brasileira de estudos regionais e urbanos**, v. 2, p. 9-32, 2008.

CESPRINI, E.; RESENTE, G.; CAUSIN, V.; URSO, T.; CAVALLI, R.; ZANETTI, M. Energy recovery of glued wood waste—A review. **Fuel**, v. 262, p. 116520, 2020.

CHARUMBIRA, M.; SUNDLE, T. Seller Concentration in the Grain Milling Industry. **American Journal of Economics and Business Administration**, v. 2, n. 3, p. 247-252, 2010.

CHIDUMAYO, E. N. Land use, deforestation and reforestation in the Zambian Copperbelt. **Land Degradation & Development**, v. 1, n. 3, p. 209–216, 1989.

CHRISTALLER, W. **Central places in southern Germany.** Trans. Charlisle W. Baskin. London: Prentice Hall, 1933.

CIARRETA, A.; NASIROV, S.; SILVA, C. The development of market power in the Spanish power generation sector: Perspectives after market liberalization. **Energy Policy**, v. 96, p. 700–710, set. 2016.

COELHO JUNIOR, L. M.; BURGOS, M. C.; SANTOS JUNIOR, E. P.; PINTO, P. A. L. A. Regional Concentration of The Gross Production Value of Firewood in Paraíba. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, p. e20170887, 2019a.

COELHO JUNIOR, L. M.; BURGOS, M. C.; SANTOS JÚNIOR, E. P. Concentração regional da produção de lenha da Paraíba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1729-1740, out./dez. 2018.

COELHO JUNIOR, L. M.; MEDEIROS, M. G.; SANTOS JUNIOR, E. P.; BORGES, L. A. C.; JOAQUIM, M. S.; SILVA, M. L. Regional concentration of charcoal production in the state of Paraíba, Brazil (1994 - 2016). **Revista Árvore**, v. 43, n. 1, p. e430105, 2019b.

COELHO JUNIOR, M. L., MARTINS, K. L. C., PINTO, P. A. L. A.; SILVA, M. V. B. Spatial distribution of firewood production in northeastern Brazil (1994-2013). **Revista Árvore**, v. 42, n.4, p. e420402, 2018.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia.** Campinas, SP: Ed. Unicamp, 2008.

COULTER, P. B. **Measuring inequality: A methodological handbook.** Routledge, 2019.

CRAWLEY, A.; BEYNON, M.; MUNDAY, M. Making Location Quotients More Relevant as a Policy Aid in Regional Spatial Analysis. **Urban Studies**, v. 50, n. 9, p. 1854–1869, 20 jul. 2013.

CROMLEY, R. G.; HANINK, D. M. Focal location quotients: Specification and applications. **Geographical Analysis**, v. 44, n. 4, p. 398-410, 2012.

CUENCA, G. M. A.; DOMPIERI, M. H. G. Dinâmica espacial da canavieira e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas. **Rev. Econ. NE**, v. 47, n. 4, p. 91–106, 2016.

D'AMBROSIO, C. Household Characteristics and the Distribution of Income In Italy: An Application of Social Distance Measures. **Review of Income and Wealth**, v. 47, n. 1, p. 43–64, 2001.

DA COSTA, T. P.; QUINTEIRO, P.; TARELHO, L. A.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Environmental impacts of forest biomass-to-energy conversion technologies: Grate furnace vs. fluidised bed furnace. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 153–162, 2018.

DAI, D. Identifying clusters and risk factors of injuries in pedestrian–vehicle crashes in a GIS environment. **Journal of Transport Geography**, v. 24, p. 206-214, 2012.

DANE, F. C. **Research methods**. Pacific Grove, Califórnia: Brooks/Cole Publishing Company, 1990.

DARMAWAN, A.; HARDI, F.; YOSHIKAWA, K.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Electricity production from black liquor: A novel integrated system. **Energy Procedia**, v. 142, p. 23–28, 2017.

DAWSON, R. How significant is a boxplot outlier? **Journal of Statistics Education**, v. 19, n. 2, p. 1–13, 2011.

DE BELLIS, N. **Bibliometrics and Citation Analysis: From the Science Citation Index to Cybermetrics**. Scarecrow Press, Lanham, MD, 2009.

DEMIRBAŞ, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357–1378, 2001.

DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 1, p. 1–18, 2007.

DEMIRBAS, A. Reuse of wood wastes for energy generation. **Energy Sources, Part A**, v. 31, n. 19, p. 1687-1693, 2009.

DEMIRBAS, M. F.; BALAT, M.; BALAT, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, p. 1746–1760, 2009.

DESJARDINS, M. R.; HOHL, A.; DELMELLE, E. M. Rapid surveillance of COVID-19 in the United States using a prospective space-time scan statistic: Detecting and evaluating emerging clusters. **Applied Geography**, v. 118, p. 102202, 2020.

DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technology**, v. 7, n. 5, p. 1801011, 2019.

DOS SANTOS, D. R.; ROCHA, P. M.; COSTA, V. G.; SOARES, Y. L. S. Economic and Financial Performance of the Brazilian Pulp and Paper Industry. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 7, p. 622 – 634, 2019.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planautina, DF, EMBRAPA Cerrados, 2004. 209 p.

DUCLOS, J. Y.; ESTEBAN, J.; RAY, D. Polarization: concepts, measurement, estimation. **Econometrica**, v. 72, n. 6, p. 1737-1772, 2004.

DURO, J. A. The international distribution of energy intensities: Some synthetic results. **Energy Policy**, v. 83, p. 257–266, ago. 2015.

DURO, J. A.; PADILLA, E. Cross-Country Polarisation in CO2 Emissions Per Capita in the European Union: Changes and Explanatory Factors. **Environmental and Resource Economics**, v. 54, n. 4, p. 571–591, 10 abr. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota técnica DEA 02/09 – **Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro**. Brasília – DF, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Brazilian Energy Balance 2019 Year 2018. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, p. 303, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Séries Históricas**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ENERDATA. **Global Statistical Yearbook 2019**. Enerdata itelligence + Consulting, 2019. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/>. Acesso em: 06 fev. 2020.

ENERDATA. **Global Statistical Yearbook 2020**. Enerdata itelligence + Consulting, 2020. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/>. Acesso em: 06 set. 2020.

ESTEBAN, J.; GRADÍN, C.; RAY, D. An extension of a measure of polarization, with an application to the income distribution of five OECD countries. **The Journal of Economic Inequality**, v. 5, n. 1, p. 1-19, 2007.

ESTEBAN, J.; RAY, D. On the measurement of polarization. **Econometrica**. v. 62, n. 4, p. 819-851, 1994.

ESTEVEES, H. B. B.; BICALHO, L. M. N. O.; OLIVEIRA FILHA, M. T. A. A Diferenciação de Preços na Comercialização de GLP: Um Problema Regulatório ou de Política Pública? **Agência Nacional do Petróleo**, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2009.

EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 5, p. 1419–1427, jun. 2010.

EZCURRA, R. Polarization trends across the US states. **Applied Economics Letters**, v. 16, n. 9, p. 897–902, mai. 2009.

FANTINEL, V. D. **Ensaio sobre polarização de renda do Brasil**. 2017. 126 f. Dissertação (Doutorado em Economia) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION. **The state of the world's forests 2018**. [Online]. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/36c8539c-dc9c-4fae-ab8e-ee5c43d30a25/>. Acesso em: 05 nov. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAO Data**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 20 ago. 2020.

FOSTER, J. E.; WOLFSON, M. C. Polarization and the decline of the middle class: Canada and the U.S. **The Journal of Economic Inequality**, v. 8, n. 2, p. 247–273, 2010.

FOTHERINGHAM, A. S. Trends in quantitative methods I: stressing the local. **Progress in Human Geography**, v. 21, n.1, p. 88-96, 1997.

FRACARO, G.; VAKKILAINEN, E.; HAMAGUCHI, M.; SOUZA, S. N. M. Energy efficiency in the Brazilian pulp and paper industry. **Energies**, v. 5, n. 9, p. 3550-3572, 2012.

FRANKENA, F. Rethinking the Scale of biomass energy conversion facilities: The case of wood-electric power. **Biomass**, v. 14, n. 3, p. 149–171, 1987.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, 2012.

GEORGE, K.; JOLL C. **Organização industrial**: crescimento e mudança estrutural. Rio de Janeiro: Zahar, 1983.

GHAFFARIYAN, M. R.; ACUNA, M.; BROWN, M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 486-493, 2013.

GINI, C. Variabilità e mutabilità (1912). In: PIZETTI, E.; SALVEMINI, T. (Ed.). **Reprinted in memorie di metodologica statistica**. Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; MILES, P.; SHIFLEY, S.; SONG, N.; STELZER, H. Regional Assessment of Woody Biomass Physical Availability as an Energy Feedstock for Combined Combustion in the US Northern Region. **Journal of Forestry**, v. 110, n. 3, p. 138–148, 2012.

GOERNDT, M. E.; AGUILAR, F. X.; SKOG, K. Resource potential for renewable energy generation from co-firing of woody biomass with coal in the Northern U.S. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 348–361, 2013.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.5, p.657–661, 2009.

GONZÁLEZ, A.; RIBA, J. R.; PUIG, R.; NAVARRO, P. Review of micro- and small-scale technologies to produce electricity and heat from Mediterranean forests' wood chips. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 143–155, 2015.

GOODCHILD, M. The validity and usefulness of laws in geographic information Science and geography. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 94, n. 2, p.300-303, 2004.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712–725, 2015.

HADDAD, P. R. **Medidas de localização e de especialização**. In: HADDAD, P. R. et al. (Org.). *Economia regional: teorias e métodos de análise*. Fortaleza: BNB-ETENE, 1989.

HALL, R. L.; HITCH, C. J. Price theory and business behavior. **Economic Papers**, Oxford, v. 2, n. 1, p. 12-45, 1939.

HALLENCREUTZ, D.; LUNDEQUIST, P. Spatial Clustering and the Potential for Policy Practice: Experiences from Cluster-building Processes in Sweden. **European Planning Studies**, v. 11, n. 5, p. 533–547, 2003.

HAN, J.; ZHU, L.; KULLDORFF, M.; HOSTOVICH, S.; STINCHCOMB, D. G.; TAALOVICH, Z.; LEWIS, R.; FEUER, E; J. Using Gini coefficient to determining optimal cluster reporting sizes for spatial scan statistics. **International Journal of Health Geographics**, v. 15, n. 1, p. 27, 2016.

HANNAH, L.; KAY, J. A. Concentration in Modern Industry: Theory, Measurement and the UK Experience; **Springer**: Berlin/Heidelberg, Germany, 1977.

HARIHARAN, A. N.; BISWAS, A. A. Critical review of the Indian Knowledge-based industry location policy against its theoretical arguments. **Regional Science Policy & Practice**. p. 1-24, 2019.

HE, Y.; GUANG, F.; WANG, M. The efficiency of electricity-use of China and its influencing factors. **Energy**, v. 163, p. 258–269, 2018.

HENRICH, E.; WEIRICH, F. Pressurized entrained flow gasifiers for biomass. **Environmental Engineering Science**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2004.

HERNÁNDEZ, U. F.; JAEGER, D.; SAMPERIO, J. I. Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 4, p. 1–19, 2018.

HILLS, M.; ALEXANDER, F. Statistical methods used in assessing the risk of disease near a source of possible environmental pollution: a review, **Journal of the Royal Statistical Society**, Series A, v. 152, p. 307 – 325, 1989.

HIRSCHMAN, A. O. **Estratégia do desenvolvimento econômico**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961. Edição original de 1958.

HOFFMANN, R.; NEY, M. G. A recente queda da desigualdade de renda no Brasil: análise de dados da PNAD, do Censo Demográfico e das Contas Nacionais. **Econômica**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 7-39, jun. 2008.

HU, Q.; YANG, H.; XU, H.; WU, Z.; LIM, C. J.; BI, X. T.; CHEN, H. Thermal behavior and reaction kinetics analysis of pyrolysis and subsequent in-situ gasification of torrefied biomass pellets. **Energy Conversion and Management**, v. 161, n. January, p. 205–214, 2018.

HUANG, Y.; LEUNG, Y. Measuring regional inequality: a comparison of coefficient of variation and Hoover concentration index. **The Open Geography Journal**, v. 2, n. 1, p. 25-34, 2009.

HUGOS, M. H. **Essentials of supply chain management**. New York: John Wiley & Sons. 2011.

HURON, M.; OUKALA, S.; LARDIÈRE, J.; GIRAUD, N.; DUPONT, C. An extensive characterization of various treated waste wood for assessment of suitability with combustion process. **Fuel**, v. 202, p. 118-128, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2018**. [s.l: s.n.]. Brasília: IBÁ, 2018. Disponível em: www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf. Acesso em: 27 de mar. de 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. [s.l: s.n.]. Brasília: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: jun. 2020.

INGRAO, C.; BANECETTI, J.; BEZAMA, A.; BLOK, V.; GOGGIO, P.; KOUKIOS, E. G.; LINDNER, M.; NEMECEK, T.; SIRACUSA, V.; ZABANIOTOU, A.; HUISINGH, D. The potential roles of bio-economy in the transition to equitable, sustainable, post fossil-

carbon societies: Findings from this virtual special issue. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 471–488, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Classificação nacional de atividades econômicas**. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/?view=divisao&tipo=cnae&versao=9&divisao=02>. Acesso em: jan. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: jul. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>, Acesso em: jul. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook (WEO)**. 2014

IOANNIDIS, A. CHALVATZIS, K. J.; LI, X.; NOTTON, G.; STEPHANIDES, P. The case for islands' energy vulnerability: Electricity supply diversity in 44 global islands. **Renewable Energy**, v. 143, p. 440–452, dez. 2019.

ISARD, W. **Location and space economy: a general theory relation to industrial location, market areas, land use trade and urban structure**. Cambridge: MIT Press, 1956.

ISARD, W. **Methods of regional analysis**. The M.I.T. Press, Massachusetts, 1960.

JENKINS, S. P. Did the middle class shrink during the 1980s? UK evidence from kernel density estimates. **Economics letters**, v. 49, n. 4, p. 407–413, 1995.

JIANG, W.; SEARLE, S.; SIDDIQUI, S. Analysis of the global wood-chip trade's response to renewable energy policies using a spatial price equilibrium model. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 3, p. 505–520, 2017.

JIN, E.; SUTHERLAND, J. W. An integrated sustainability model for a bioenergy system: Forest residues for electricity generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 10–21, 2018.

JING, N.; CAI, W. Analysis on the spatial distribution of logistics industry in the developed East Coast Area in China. **The Annals of Regional Science**, v. 45, n. 2, p. 331–350, 2010.

JUVENAL, T.L.; MATTOS, R.L.G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3–29, 2002.

KABIR, M. M.; RAJENDRAN, K.; TAHERZADEH, M. J.; HORVÁTH, I. S. Experimental and economical evaluation of bioconversion of forest residues to biogas using organosolv pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 201–208, 2015.

KALT, G.; MAYER, A.; THEURL, N. C.; LAUK, C.; ERB, K. H.; HABERI, H. Natural climate solutions versus bioenergy: Can carbon benefits of natural succession compete with bioenergy from short rotation coppice? **GCB Bioenergy**, v. 11, n. 11, p. 1283–1297, 2019.

KAMIŃSKI, J. The development of market power in the Polish power generation sector: A 10-year perspective. **Energy Policy**, v. 42, p. 136–147, 2012.

KILPELÄINEN, A.; ALAM, A.; TORSSONEN, P.; RUUSUVUORI, H.; KELLOMÄKO; PELTOLA, H. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilisation from final felling of Norway spruce. **Biomass and Bioenergy**, v. 87, p. 1–8, 2016.

KIZHA, A. R.; HAN, H. S. Forest residues recovered from whole-tree timber harvesting operations. **European Journal of Forest Engineering**, v. 1, n. 2, p. 46-55, 2015.

KON, A. **Economia Industrial: teoria e estratégias**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017. 256p.

KRUGMAN, P. Increasing returns and economic geography. **Journal of Political Economy**, v. 99, n. 3, p. 483–499, 1991.

KULLDORFF, M. A spatial scan statistic. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v. 26, n. 6, p. 1481–1496, 1997.

KULLDORFF, M.; HEFFERNAN, R.; HARTMAN, J.; ASSUNÇÃO, R.; MOSTASHARI, F. A Space–Time Permutation Scan Statistic for Disease Outbreak Detection. **PLoS Medicine**, v. 2, n. 3, p. e59, 2005.

KULLDORFF, M. **SaTScan™ user guide for version 9.4**, 2015.

KULLDORFF, M.; NAGARWALLA, N. Spatial disease clusters: Detection and inference. **Statistics in Medicine**, v. 14, n. 8, p. 799–810, 1995.

KUMAR, J. V.; PRATT, B. C. Compositional analysis of some renewable biofuels. **American Laboratory**, v. 28, n. 8, p. 15–20, 1996.

KUMAR, L.; SINHA, P.; TAYLOR, S.; ALGURASHI, A. F. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, n. 1, p. 097696, 2015.

LABINI, P.S. **Oligopólio e progresso técnico**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1980. 360p.

LANDES, W. M.; POSNER, R. A. Market power in antitrust cases. **Harvard Law Review**, v. 94, n. 5, p. 937-996, 1981.

LERMAN, I. A note on the calculation the Gini index. **Economics Letters**, v. 15, p. 363–368, 1984.

LEWTAS, J. Air pollution combustion emissions: Characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. **Mutation Research - Reviews in Mutation Research**, v. 636, n. 1–3, p. 95–133, 2007.

LI, J.; WAN, G.; WANG, C.; ZHANG, X. Which indicator of income distribution explains crime better? Evidence from China. **China Economic Review**, v. 54, p. 51–72, abr. 2019.

LIEU, T. A.; RAY, G. T.; KLEIN, N. P.; CHUNG, C.; KULLDORFF, M. Geographic Clusters in Underimmunization and Vaccine Refusal. **Pediatrics**, v. 135, n. 2, p. 280–289, 2015.

LINDE, K.; WILLICH, S. N. How objective are systematic reviews? Differences between reviews on complementary medicine. **Journal of the Royal Society of Medicine**, v. 96, n. 1, p. 17–22, 2003.

LIU, G.; MIRZAEI, A.; VANDOROS, S. The impact of bank competition and concentration on industrial growth. **Economics Letters**, v. 124, n. 1, p. 60-63, 2014.

LIU, Z.; JOHNSON, T. G.; ALTMAN, I. The moderating role of biomass availability in biopower co-firing — A sensitivity analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 523–532, 2016.

LODDER, C. A. Padrões locacionais e desenvolvimento regional. **Revista Brasileira de Economia**, v. 28, n.1, p. 3-128, 1974.

LOONEY, B. **BP statistical review of world energy 2020**. BP Statistical Review, London, UK. Disponível em: <https://www.bp.com/>. Acesso em: 1 set. 2020.

LÖSCH, A. **The Economics of Location**. Translated in 1954 by WH Woglam and WF Stolper. Yale University, New Haven, CT. 1940.

LUNDMARK, R.; ATHANASSIADIS, D.; WETTERLUND, E. Supply assessment of forest biomass - A bottom-up approach for Sweden. **Biomass and Bioenergy**, v. 75, p. 213–226, 2015.

MAGALHÃES JR, A. I.; CARVALHO, J. C.; PEREIRA, G. V. M.; KARP, S. G.; CAMARA, M. C.; MEDINA, J. D. C.; SOCCOL, C. R. Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 6, p. 1505-1519, 2019.

MANDØ, M. Direct combustion of biomass. *In*: ROSENDAHL, L. (Ed.). **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Woodhead Publishing, 2013. p. 61-83.

MANTAU, U.; SAAL, U.; PRINS, K; STEIERER, F.; LINDNER, M.; VERKERK, H.; EGGERS, J.; LEEK, N.; OLDENBURGER, J.; ASIKAIEN, A.; ANTTILA, P. Real potential for changes in growth and use of EU forests. Hamburg: EUwood, **Methodology report**, 2010.

MARQUES, M. I. M. Considerações sobre a expansão da indústria de papel e celulose no Brasil a partir do caso da Suzano Papel e Celulose. **GEOgraphia**, v. 17, n. 35, p. 120-147, 2015.

MARSHAL R. C. A review of the statistical analysis of spatial patterns of disease, **Journal of the Royal Statistical Society**, Series A, v. 154, p. 421-441, 1991.

MARSHALL, A. (1920). **Princípios de economia**. São Paulo: Nova Cultural, 1984.

MASHHOODI, B. Spatial dynamics of household energy consumption and local drivers in Randstad, Netherlands. **Applied Geography**, v. 91, p. 123–130, 2018.

MAZAHERI, N.; AKBARZADEH, A. H.; MADADIAN, E.; LESFRUD, M. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 671–688, 2019.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

MEDEIROS, M. **Medidas de desigualdade e pobreza**. Editora Universidade de Brasília, 2012.

MEDINA, H. **Consideraciones sobre el índice de Gini para medir la concentración del ingreso**. Cepal, 2001.

MESFUN, S.; LEDUC, S.; PATRIZIO, P.; WETTERLUND, E.; PONCE, A. P.; LAMMENS, T.; STARITSKY, I.; ELBERSEN, B.; LUNDGREN, J.; KRAXNER, F. Spatio-temporal assessment of integrating intermittent electricity in the EU and Western Balkans power sector under ambitious CO₂ emission policies. **Energy**, v. 164, n. 2018, p. 676–693, 2018.

MIRANDA, R. C.; BAILIS, R.; VILELA, A. O. Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 171-176, 2013.

MIRZA, M. Advertising Restrictions and Market Concentration in the Cigarette Industry: A Cross-Country Analysis. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 18, p. 3364, 2019.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy and Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

MOLNAR, M. Income polarization in Romania. **Romanian Journal of Economic Forecasting**, v. 14, n. 2, p. 64–83, 2011.

MONASTÉRIO, L. Indicadores de análise regional e espacial. *In*: CRUZ, B. O; FURTADO, B. A; MONASTERIO, L; JÚNIOR, W. R. **Economia Regional e Urbana: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.

MONASTERIO, L.; CAVALCANTE, L. R. Fundamentos do Pensamento Econômico Regional. *In*: CRUZ, B. O; FURTADO, B. A; MONASTERIO, L; JÚNIOR, W. R.

Economia Regional e Urbana: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. **Geoderma**, v. 163, n. 3-4, p. 247-255, 2011.

MULLIGAN, G. F. Equality measures and facility location. **Papers in Regional Science: The Journal of the RSAI**, v.70, n.4, p. 345-65, 1991.

MURPHY, J. D.; POWER, N. M. An argument for using biomethane generated from grass as a biofuel in Ireland. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 504-512, 2009.

MYRDAL, G. Teoria econômica e regiões subdesenvolvidas. Belo Horizonte: Biblioteca Universitária – UFMG, 1960. Edição original de 1957.

NAQVI, M.; YAN, J.; DAHLQUIST, E. Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. **Bioresource technology**, v. 101, n. 21, p. 8001-8015, 2010.

NAUS, J. The distribution of the size of maximum cluster of points on the line. **Journal of the American Statistical Association**, n.60, p. 532-538, 1965.

NIGATU, A. M.; GELAYE, K. A.; DEGEFIE, D. T.; BIRHANU, A. Y. Spatial variations of women's home delivery after antenatal care visits at lay Gayint District, Northwest Ethiopia. **BMC Public Health**, v. 19, n. 1, p. 677, 3 dez. 2019.

NIKOLAISEN, L. S.; JENSEN, P. D. Biomass feedstocks: categorisation and preparation for combustion and gasification. *In*: ROSENDAHL, L. (Ed.). **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Woodhead Publishing, 2013. p. 36-57.

NISHIGUCHI, S.; TABATA, T. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1279-1286, 2016.

NOGUEIRA, L.A.H; LORA, E.E. **Wood Energy: Principles and Applications**. Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica Distribuída – NEST, do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá- UNIFEI, 2002. Disponível em: http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/Capitulo_1F.pdf. Acesso em 12 de out. de 2019.

NORGATE, T.; HAQUE, N.; SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. **ISIJ international**, v. 52, n. 8, p. 1472-1481, 2012.

NORTH, D. **Agriculture in regional economic growth**. Journal of Farm Economics, v. 41, n. 5, p. 943-51, 1959.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, n. April 2019, p. 109658, 2020.

O'LOUGHLIN, J.; WITMER, F. D. W. The localized geographies of violence in the North Caucasus of Russia, 1999–2007. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 101, n. 1, p. 178-201, 2011.

OLIVER, A.; KHANNA, M. Demand for biomass to meet renewable energy targets in the United States: implications for land use. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 9, p. 1476–1488, 2017.

OLUGBADE, T.; OJO, O.; MOHAMMED, T. Influence of binders on combustion properties of biomass briquettes: a recent review. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 2, p. 241-259, 2019.

OPENSHAW, K. Biomass energy: Employment generation and its contribution to poverty alleviation. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 3, p. 365–378, 2010.

OTSUKA, A. Regional energy demand in Japan: dynamic shift-share analysis. **Energy, Sustainability and Society**, v. 6, n. 1, p. 10, 2016.

PALAURO, G. R. **Caracterização do mercado de combustível de aviação**: um estudo de Organização Industrial. 2015. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2015. Acesso em: 21 de fevereiro de 2020.

PAN, J.; LI, J. Spatiotemporal Dynamics of Electricity Consumption in China. **Applied Spatial Analysis and Policy**, v. 12, n. 2, p. 395–422, 4 jun. 2019.

PAREDES-SÁNCHEZ, J. P.; OCHOA, L. M. L.; GONZÁLEZ, L. M. L.; CASA, J. L. H.; BERNAT, J. X. Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 553–568, 2019.

PATIL, G. P.; MODARRES, R.; PATANKAR, P. Spatially constrained clustering and upper level set scan hotspot detection in surveillance geoinformatics. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 13, n. 4, p. 365–377, 2006.

PEDROSO, L. L. A.; SILVA, F. F.; SILVA, F. F.; MELO, A. M.; ERTHAL JUNIOR, M.; SHIMOYA, A.; MATIAS, I. O.; SOUZA, C. L. M. Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, p. 1980-1996, 2018.

PERCHINUNNO, P.; MONGELLI, L.; ROTONDO, F. A multidimensional approach for the identification of environmental and health wellness territories. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105911, mar. 2020.

PERLIN, J; JORDAN, P. Running out: 4200 years of wood shortages. **The Convolution Quarterly** (Spring), Sausalito, p. 18-25, 1983.

PERLOFF, J.; CARLTON, D. **Modern industrial organization**. Pearson/Addison Wesley, 2005.

PEROBELLI, F. S.; ALMEIDA, E. S.; ALVIM, M. I. S. A.; FERREIRA, P. G. C. Produtividade do setor agrícola brasileiro (1991-2003): uma análise espacial. **Nova Economia**, v. 17, n. 1, p. 65–91, abr. 2007.

PEROBELLI, F. S.; OLIVEIRA, C. C. C. Energy development potential: An analysis of Brazil. **Energy Policy**, v. 59, p. 683–701, 2013.

PERROUX, F. O conceito de polo de desenvolvimento. *In*: SCHWARTZMAN, J. (Org.). **Economia regional: textos escolhidos**. Belo Horizonte: Cedeplar, p. 145-156, 1977. Edição original de 1955.

PIACENTI, C.; ALVES, L. R.; LIMA, J. F. O Perfil Locacional do Emprego Setorial no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 39, n.3, p. 482-502, jul./set. 2008.

PIMENTEL, D. MORAN, M. A.; FAST, S.; WEBER, G.; BUKANTIS, R.; BALLIETT, L.; BOVENG, P.; CLEVELAND, C.; HINDMAN, S.; YOUNG M. Biomass energy from crop and forest residues. **Science**, v. 212, n. 4499, p. 1110–1115, 1981.

POKHAREL, R.; GRALA, R. K.; GREBNER, D. L. Woody residue utilization for bioenergy by primary forest products manufacturers: An exploratory analysis. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 161-171, 2017.

POKHAREL, R.; GRALA, R. K.; GREBNER, D. L.; COOK, W. Mill Willingness to Use Logging Residues to Produce Electricity: A Spatial Logistic Regression Approach. **Forest Science**, v. 65, n. 3, p. 277–288, 2019.

PORTER, M. E. Clusters and the new economics of competition. **Harvard Business Review**, v.76, n. 6, p. 77-90, 1998.

PORTER, M. E. Location, competition, and economic development: local clusters in a global economy. **Economic Development Quarterly**, v. 14, n. 1, p. 15-34, 2000.

PORTER, M. E. **The Competitive Advantage of Nations** (London and Basingstoke). Basingstoke, Macmillan, 1990.

POSSAS, M. L. **Estruturas de Mercado em Oligopólio: economia e planejamento**. 2ª ed. São Paulo: Hucitec, 1999. 191 p.

PRADHAN, P.; ARORA, A.; MAHAJANI, S. M. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. **Energy for Sustainable Development**, v. 43, p. 1–14, 2018.

PURWANTO, A.; SUSNIK, J.; SURYADI, F. X.; FRAITURE, C. Determining strategies for water, energy, and food-related sectors in local economic development. **Sustainable Production and Consumption**, v. 16, p. 162–175, 2018.

RAMESH, S.; CHAURASIA, A. S.; MAHALINGAM, H.; RAO, N. J. Kinetics of Devolatilization of Black Liquor Droplets in Chemical Recovery Boilers-Pyrolysis of Dry Black Liquor Solids. **Int J Chem Eng Appl**, v. 4, p. 1–5, 2013.

RANDERSON, J. T.; CHEN, Y.; VAN DER WERF, G. R.; ROGERS, B. M.; MORTON, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. **Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences**, v. 117, n. 4, 2012.

RANDOLPH, K. D. Using satscan spatial-scan software with national forest inventory data: A case study in South Carolina. **Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences**, v. 9, n. 1, p. 1–13, 2017.

RANIUS, T.; HÄMÄLÄINEN, A.; EGNELL, G.; OLSSON, B.; EKLÖF, K.; STENDAHL, J.; RUDOLPHI, J. The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis. **Journal of Environmental Management**, v. 209, p. 409–425, 2018.

RAVIV, O.; BROITMAN, D.; AYALON, O.; KAN, I. A regional optimization model for waste-to-energy generation using agricultural vegetative residuals. **Waste Management**, v. 73, p. 546–555, 2018.

RENTIZELAS, A. A. Biomass supply chains. *In*: ROSENDAHL, L. (Ed.). **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Woodhead Publishing, 2013. p. 9–35.

RESENDE, M. Medidas de concentração industrial: uma resenha. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 12, n. 21, p. 24–33, jul./set. 1994.

RÍOS, M. A. G. **Apuntes de economía regional**. Chile: PNUD, 2010.

ROCHA, A.; PEROBELLI, F. Spatial distribution of logistics services in Brazil: A potential market analysis. **Regional Science Policy & Practice**, v. 12, n. 1, p. 185–217, 2020.

ROMERO, C. W. A. S.; BERNI, M. D.; FIGUEIREDO, G. K. D. A.; FRANCO, T. T.; LAMPARELLI, R. A. C. Assessment of agricultural biomass residues to replace fossil fuel and hydroelectric power energy: A spatial approach. **Energy Science and Engineering**, v. 7, n. 6, p. 2287–2305, 2019.

ROSILLO-CALLE, F.; HALL, D. O. Biomass energy, forests and global warming. **Energy Policy**, v. 20, n. 2 pp124–136, 2002.

ROSILLO-CALLE, F.; WOODS, J. **The biomass assessment handbook**. Routledge. 2012

RUIZ, P. C.; NIJS, W.; TARVYDAS, D.; SGOBBI, A.; ZUCKER, A.; PILLI, R. et al. ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, n. September 2019, p. 100379, 2019.

SABERI, M. K.; SAHEBI, S.; ZEREHS AZ, M. Visualization of the Koomesh journal between 2006 and 2017: A bibliometric study. **Koomesh Journal**, v. 22, n. 1, p. 1–9, 2020.

SACIROVIC, S.; KETIN, S.; VIGNJEVIC, N. Eco-industrial zones in the context of sustainability development of urban areas. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 24, p. 24346–24356, 2019.

SADHUKHAN, J.; HERNANDEZ, E. M.; MURPHY, E. J.; NG, D. K. S.; HASSIM, M. H. et al. Role of bioenergy, biorefinery and bioeconomy in sustainable development: Strategic pathways for Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. April, p. 1966–1987, 2018.

SAIDUR, R.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, 2011.

SAMPAIO, R.S. **Conversão da biomassa em carvão vegetal**. Situação Atual com Tendências 2025. CGEE- Centro De Gestão e Estudos Estratégicos. Belo Horizonte, 2008.

SÁNCHEZ-GARCÍA, S.; CANGA, E.; TOLOSANA, E.; MAJADA, J. A spatial analysis of woodfuel based on WISDOM GIS methodology: Multiscale approach in Northern Spain. **Applied Energy**, v. 144, p. 193–203, 2015.

SANSANIWAL, S. K.; PAL, K.; ROSEN, M. A.; TYAGI, S. K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 72, p. 363-384, 2017.

SANTOS JÚNIOR, E. P. **Categoria Graduando 1º Lugar**: Concentração e distribuição espacial da oferta brasileira de bioeletricidade florestal. 2019.

SANTOS, U. P.; DINIZ, C. C. A interação universidade-empresa na siderurgia de Minas Gerais. **Nova Economia**, v. 23, n. 2, p. 279-306, 2013.

SCHERER, F. M.; ROSS, D. Industrial market structure and economic performance. 3rd ed. Boston: Houghton Mifflin, 1990. 270 p.

SCHMIDT, J.; LEDUC, S.; DOTZAUER, E.; KIRDERMANN, G.; SCHMID, E. Potential of biomass-fired combined heat and power plants considering the spatial distribution of biomass supply and heat demand. **International Journal of Energy Research**, v. 34, n. 11, p. 970–985, 2010.

SCOTT, A. J. **On Hollywood**: The place, the industry. Princeton, Princeton University Press, 2005.

SEDJO, R. A. The economics of forest-based biomass supply. **Energy Policy**, v. 25, n. 6, p. 559-566, 1997.

SHEKEDE, M. D.; MUPANDIRA, I.; GWITIRA, I. Spatio-temporal clustering of active wildfire pixels over a 19-year period in a southern African savanna ecosystem of Zimbabwe. **South African Geographical Journal**, p. 1–20, 2 jul. 2020.

SILVA, I. M.; SANTANA, A. C.; GOMES, S. C.; TOURINHO, M. M. Associação de dados espaciais: uma análise exploratória para desenvolvimento econômico do estado do Pará. **Revista Teoria e Evidência Econômica**, v. 17, n. 36, 2011.

SILVA, N. C. N.; OLIVEIRA, M. S.; SANTOS, G. R.; BRAGA, A. S.; Análise de dados de área aplicada a dois indicadores econômicos de mesorregiões do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Biometria*, São Paulo, v. 29, n.3, p. 369-395, 2011.

SILVA, R. R.; MATHIAS, F. R. DE C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. **Energy**, v. 153, p. 816–824, 2018.

SIMIONI, F.J., MOREIRA, J.M.M.A.P., FACHINELLO, A.L., BUSCHINELLI, C.C. de A., MATSUURA, M.I.S.F., 2017. Evolution and concentration of the production of firewood and charcoal from forestry in Brazil. **Ciência Florestal** 27, 731–742. <https://doi.org/10.5902/1980509827758>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Produção florestal**. 2017. Disponível: <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>. Acesso em: 05 nov. 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Boletim SNIF 2019**. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/producao/94-producao-economia-e-mercado-florestal>. Acesso em: jun. 2020.

SLEUWAEGEN, L.E.; DEHANDSCHUTTER, W.V. The Herfindahl index and concentration ratios revisited. **Antit. Bull.**, v.34, p. 625-640, 1986.

SMYTH, C. E.; SMILEY, B. P.; MAGNAN, M.; BIRDSEY, R.; DUGAN, A. J.; OLGUIN, M.; MASCORRO, V. S.; KURZ, W. A. Climate change mitigation in Canada's forest sector: A spatially explicit case study for two regions. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2018.

SOLOMON, B.; LUZADIS, V. A. (Ed.). **Renewable energy from forest resources in the United States**. Routledge, 2008.

SOUSA, E. P.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; VALVERDE, S. R. Desempenho do setor florestal para a economia brasileira: uma abordagem da matriz insumo-produto. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 1129-1138, 2010.

SOUZA, J. R. F. DE; PIETRAFESA, P. A. A nova indústria do sudoeste maranhense: impactos socioeconômicos na cidade de Imperatriz – MA. **Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 9, n. 9, p. 143–155, 2019.

SOUZA, N. J. Economia Regional: Conceitos e Fundamentos Teóricos. **Revista Perspectiva Econômica**, Universidade Vale do Rio dos Sinos, Ano XVI, v. 11, nº. 32, p. 67-102, 1981.

STASKO, T. H.; CONRADO, R. J.; WANKERL, A.; LABATUT, R.; TASSEFF, R.; MANNION, J. T.; GAO, H. O.; SANBORN, S. D.; KNOTT, G. Mapping woody-biomass supply costs using forest inventory and competing industry data. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 263–271, 2011.

STEUBING, B.; BALLMER, I.; GASSNER, M.; GERBER, L.; PAMPURI, L.; BISCHOF, S.; THESS, E.; ZAH, R. Identifying environmentally and economically optimal bioenergy plant sizes and locations: A spatial model of wood-based SNG value chains. **Renewable Energy**, v. 61, p. 57–68, 2014.

STEVENSON, J. R.; EMRICH, C. T.; MITCHELL, J. T.; CUTTER, S. L. Using Building Permits to Monitor Disaster Recovery: A Spatio-Temporal Case Study of Coastal Mississippi Following Hurricane Katrina. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 37, n. 1, p. 57–68, jan. 2010.

SUN, Y.; WANG, R. LIU, J.; XIAO, L.; LIN, Y.; KAO, W. Spatial planning framework for biomass resources for power production at regional level: A case study for Fujian Province, China. **Applied Energy**, v. 106, p. 391–406, 2013.

SUZIGAN, W.; FURTADO, J.; GARCIA, R.; SAMPAIO, S. E. Coeficientes de Gini locais—GL: aplicação à indústria de calçados do Estado de São Paulo. **Nova Economia**, v. 13, n. 2, 2003.

THISSE, J. F. Geografia Econômica. In: CRUZ, B. O; FURTADO, B. A; MONASTERIO, L; JÚNIOR, W. R. **Economia Regional e Urbana: Teorias e Métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011. p. 17-42.

THUMANN, A.; MEHTA, D. P. **Handbook of energy engineering**. The Fairmont Press, Inc., 2001.

THÜNEN, J. H. V. **The isolated state**. New York: Pergamon Press, 1966. Edição original de 1826.

TIAN, W.; SONG, J.; LI, Z. Spatial regression analysis of domestic energy in urban areas. **Energy**, v.76, p. 629-640, 2014.

TILLMAN, D. A. Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, n. 6, p. 365–384, 2000.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234–40, 1970.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord)**. – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, set. 2003.

TUSHAJ, A. **Market concentration in the banking sector: Evidence from Albania.** BERG Working paper series on government and growth, 2010.

UPRETI, B. R.; VAN DER HORST, D. National renewable energy policy and local opposition in the UK: The failed development of a biomass electricity plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 1, p. 61–69, 2004.

VALDETARO, E. B.; SILVA, F. L.; RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G. GONÇALVES, L. A. Contribuição dos créditos de carbono na viabilidade econômica dos contratos de fomento florestal no sul da Bahia. **Revista Árvore**, v. 35, n. 6, p. 1307–1317, 2011.

VAN KERM, P. Generalized Gini and Concentration coefficients (with factor decomposition) in Stata. **CEPS/INSTEAD**, Di erdange, v. 1, p. 1–12, 2009.

VAN RAAN, A. F. J. For Your Citations Only? Hot Topics in Bibliometric Analysis. **Measurement: Interdisciplinary Research & Perspective**, v. 3, n. 1, p. 50–62, jan. 2005.

VARUM, C.; VALENTE, H.; RESENDE, J.; PINHO, M.; SARMENTO, P.; JORGE, S. **Economia Industrial: Teoria e exercícios práticos.** 1ª ed. Lisboa: Sílabo, 2016.

VERGAMINI, D.; BARTOLINI, F.; PROSPERI, P.; BRUNORI, G. Explaining regional dynamics of marketing strategies: The experience of the Tuscan wine producers. **Journal of Rural Studies**, v. 72, p. 136-152, 2019.

VERÓN, S. R.; JOBBÁGY, E. G.; DI BELLA, C. M.; PARUELO, J. M.; JACKSON, R. B. Assessing the potential of wildfires as a sustainable bioenergy opportunity. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 634–641, 2012.

VICCARO, M.; COZZI, M.; CANANI, D.; MASI, S.; MANCINI, I. M.; CAIVANO, M.; ROMANO, S. Wastewater reuse: An economic perspective to identify suitable areas for poplar vegetation filter systems for energy production. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 12, p. 1–14, 2017.

VIEIRA, N. N.; CANÇADO, A. L. F. Identificação de conglomerados espaciais de acidentes aéreos no Brasil. **Revista Conexão SIPAER**, v. 4, n. 2, p. 64-76, 2013.

VON THÜNEN, J. H. Der isolierte staat in beziehung auf landwirtschaft und nationalökonomie. Hamburg: Perthes, 1826. Translation: **The isolated state.** Oxford: Pergammon Press, 1966.

WANG, J.; CAMINADA, K.; WANG, C. Measuring Income Polarization for Twenty European Countries, 2004–13: A Shapley Growth-Redistribution Decomposition. **Eastern European Economics**, v. 55, n. 6, p. 477–499, 2017.

WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, 2016.

WANG, S.; LUO, K. Life expectancy impacts due to heating energy utilization in China: Distribution, relations, and policy implications. **Science of the Total Environment**, v. 610–611, p. 1047–1056, 2018.

WANG, S.; SONG, J.; WANG, X. E.; WANG, W. The Spatial and Temporal Research on the Coupling and Coordinated Relationship between Social Economy and Energy Environment in the Belt and Road Initiatives. **Sustainability**, v. 11, n. 2, p. 407, 2019.

WEBER, A. **Theory of the location of industries**. Chicago: University of Chicago Press, 1929.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. 13–23, 2002.

WENG, Q. Local impacts of the post-Mao development strategy: the case of the Zhujiang Delta, southern China. **International Journal of Urban and Regional Research**, v. 22, n. 3, p. 425-442, 1998.

WHITE, M. D.; MARSH, E. E. Content analysis: A flexible methodology. **Library Trends**, v. 55, n. 1, p. 22–45, 2006.

WIKLE, T. A. Geographical patterns of membership in US environmental organizations. **The Professional Geographer**, v.47, n.1, p. 41-48, 1995.

WOLAK, F. A. Measuring the competitiveness benefits of a transmission investment policy: The case of the Alberta electricity market. **Energy policy**, v. 85, p. 426-444, 2015.

WOLF, J. P. Biomass combustion for power generation: an introduction. *In*: ROSENDAHL, L. **Biomass combustion science, technology and engineering**. Woodhead, 2013. p. 3-8.

WOLFSON, M. C. When inequalities diverge. **American Economic Review**, v. 84, n. 2, p. 353-358, 1994.

WOO, H.; ACUNA, M.; CHO, S.; PARK, J. Assessment Techniques in Forest Biomass along the Timber Supply Chain. **Forests**, v. 10, n. 11, p. 1018, 2019.

WORLD BANK. **Forest area** (% of land area). World Bank, 2019. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS>. Acesso em: 2 jan. 2020.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global Bioenergy Statistics 2018**. Disponível em: <https://worldbioenergy.org/>. Acesso em: 15 de jul. 2019.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources 2016. **World Energy Council 2016**, p. 6–46, 2016.

YADAV, S. K.; SINGH, S.; GUPTA, R. Measures of Location. *In*: **Biomedical Statistics**. Springer, Singapore, 2019. p. 53-58.

YANG, Y.; WONG, K. K. F. Spatial distribution of tourist flows to China's cities. **Tourism Geographies**, v. 15, n. 2, p. 338-363, 2013.

YI, C. An Analysis on the Determinants of the Agglomeration by Industrial Type in Seoul Metropolitan Region with Spatial Econometrics. **Gyeonggi Res. Inst.**, v. 16, n. 14, p. 1–33. 41, 2016.

ZERBINI, F. **Cenário da Madeira FSC no Brasil 2012 – 2013**. São Paulo, SP: FSC Brasil, 2014. p.80.

ZHAO, H.; LIN, B. Will agglomeration improve the energy efficiency in China's textile industry: Evidence and policy implications. **Applied Energy**, v. 237, p. 326–337, mar. 2019.

ZHENG, Q.; LIN, B. Impact of industrial agglomeration on energy efficiency in China's paper industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1072–1080, maio 2018.