



DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA BIOELETRICIDADE SUCROENERGÉTICA BRASILEIRA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5173

Autores: LUIZ MOREIRA COELHO JUNIOR, EDVALDO PEREIRA SANTOS JUNIOR, BRUNNA HILLARY CALIXTO DE OLIVEIRA, CLEANI FIGUEREDO FIDELES DA SILVA, ANNA MANUELLA MELO NUNES, MONICA CARVALHO

Resumo: A bioeletricidade é um tipo de energia elétrica gerada a partir da queima de biomassa, advinda da matéria orgânica de origem vegetal ou animal. Este artigo analisou a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade sucroenergética no Brasil para 2024. Os dados foram obtidos no Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para avaliar a dependência espacial utilizou a análise exploratória de dados espaciais por meio do índice de Moran global e local. Os principais resultados mostraram a biomassa como quarta maior fonte outorgada do país. O $IMoran_{Global}$ indicou pequena autocorrelação espacial para a potência outorgada, sendo um pouco maior para a quantidade de geradores de eletricidade a partir dessa fonte. O índice local ($IMoran_{Local}$) evidenciou a existência de clusters de alta capacidade outorgada e número de geradores, sendo os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná e Minas Gerais o agrupamento mais forte para essa oferta no país. Conclui-se que o conhecimento do padrão espacial do setor de bioeletricidade sucroenergética, apresentado neste estudo, pode contribuir no entendimento da dinâmica de geração e auxilia investidores e formuladores de políticas na tomada de decisão quanto a localização e implementação de novos empreendimentos.

Palavras-chave: Energias renováveis; Bioenergia; Economia regional; Estudo de mercado.

DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA BIOELETRICIDADE SUCROENERGÉTICA BRASILEIRA

1 INTRODUÇÃO

A bioeletricidade é um tipo de energia elétrica gerada a partir da queima de biomassa, advinda da matéria orgânica de origem vegetal ou animal. Destaca-se a importância da bioeletricidade em razão do enfrentamento das metas assumidas pelo Brasil em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) da COP21. Seu uso possui baixas emissões de carbono, e podem até ser consideradas neutras em carbono quando associadas a práticas sustentáveis, tornando-se uma opção estratégica na oferta interna de energia, em busca de segurança energética e manutenção do nível de CO₂ na atmosfera, com base na economia circular. A economia verde busca melhorar o bem-estar da humanidade e a igualdade social, mitigando os riscos ambientais e a escassez ecológica. Para ser mais eficiente e atender aos objetivos do desenvolvimento sustentável - ODS, as nações devem associar estratégias de economias de baixo carbono utilizando-se de mecanismos circulares, seja em escala e escopo, considerando as vantagens comparativas e competitivas que os detém (NUNES et al., 2023; TEDESCO et al., 2022, SANTOS JUNIOR et al. 2022a).

No setor sucroenergético (indústria sucroalcooleira) tem principal matéria prima, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e distinguir-se por sua capacidade de produzir energia limpa em larga escala e é uma alternativa para solucionar os problemas decorrentes das mudanças do clima. Esse segmento passou e passa por transformações e rearranjos por estar tão imbuído nos aspectos de ordem político-legal, econômica, tecnológica, social e ambiental. No setor sucroenergético, a diversificação do portfólio de produtos em âmbito geral também tem origem a partir da geração de estratégias eficazes na mitigação dos riscos. Principalmente na descarbonização do setor de transportes, diante da necessidade da substituição frente aos combustíveis fósseis (MILANEZ et al. 2020; UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA – ÚNICA, 2024).

Na última década, os determinantes das decisões de investimento do setor foram a atratividade do etanol de cana-de-açúcar e a bioeletricidade gerada com base no bagaço de cana. Atualmente se aproveita apenas 15% do potencial, mas se houvesse o aproveitamento pleno da biomassa presente nos canaviais, a bioeletricidade teria potencial técnico para chegar a 151 mil GWh, o que representaria atender mais de 30% do consumo de energia no Sistema Integrado Nacional (SIN). Estimulada pelo Programa RenovaBio e por um ambiente de negócios favorável, a bioeletricidade para a rede tem potencial para crescer mais de 55% até 2030. Em 2023, a produção bioeletricidade de cana foi de 21 mil GWh, representando 75% de toda a geração de energia elétrica a partir de biomassa no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2023; ÚNICA, 2024).

Nas regiões com potencial de oferta de bioeletricidade estimulam os polos de desenvolvimento, o qual é uma unidade econômica motriz ou um conjunto formado por várias dessas unidades. A economia regional busca entender a relação das atividades econômicas em uma determinada região geográfica. Porém, não incorporam elementos teóricos suficientes para explicar adequadamente os fenômenos espaciais. Concentrando-se na análise dos padrões e distribuições espaciais de fenômenos e variáveis, levando em consideração a localização geográfica dos dados, a economia espacial visa compreender como a geografia afeta os processos econômicos, explorando a relação entre espaço e o comportamento das variáveis estudadas. Dentro da economia espacial, possui a análise

exploratória de dados espaciais (AEDE), que é uma abordagem que integra técnicas estatísticas espaciais e geográficas para identificar tendências, padrões e associações espaciais de uma atividade econômica. Este método considera os dados de forma holística, examinando o comportamento conjunto e explorando a relação da potência instalada com variáveis geográficas, socioeconômicas e ambientais (FREITAS et al., 2022).

A AEDE também leva em conta as interações individuais e seu impacto no comportamento coletivo e nos padrões estabelecidos, revelando a influência mútua entre regiões e sua vizinhança. A autocorrelação espacial é uma medida que avalia a correlação entre as variáveis e sua proximidade geográfica. Essa análise ajuda a identificar clusters, outliers e padrões de dispersão espacial nos dados (Anselin, 1988; Cabral et al., 2017; LI et al., 2022). Nos últimos anos, observou-se aumento em agregar a análise espacial à modelagem econômica e alguns ensaios se destacam como Cabral et al. (2017) que fizeram a previsão do consumo de energia elétrica no Brasil; Coelho Junior et al. (2018) avaliaram a distribuição espacial da produção de lenha no Nordeste brasileiro; Dunn et al. (2019) analisaram os dados de interrupção de energia e identificaram heterogeneidade espacial e temporal na confiabilidade da rede elétrica; Zhang (2021) mostrou as características espaciais da energia de baixo carbono na China; Santos Junior et al. (2022b), que realizaram análise da distribuição e dependência espaço-temporal da oferta de bioeletricidade florestal no Brasil; e Szaruga et al. (2022), que verificaram a autocorrelação espacial da instabilidade da rede elétrica no contexto da produção de eletricidade a partir de fontes energias renováveis em regiões polonesas.

Em busca de compreender o setor sucroenergético brasileiro e apoiar o desenvolvimento da pesquisa e do ensino das engenharias no nordeste brasileiro a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba - FAPESQ lançou a Edital N 19-2022 Programa de Apoio ao Núcleo Consolidador do Estado da Paraíba. Nesta chamada foi aprovado o Projeto N 057-2023 - Estrutura de mercado e ecoeficiência da oferta brasileira de bioeletricidade sucroenergética com parceria da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Neste movimento envolveram professores/pesquisadores, inclusive com bolsas de produtividade do CNPq, alunos do Programas de Pós-Graduação da área de Engenharias III da CAPES, como o Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis – PPGER/UFPB e alunos de graduação dos cursos de Engenharia Elétrica/UFPB, Engenharia de Energias Renováveis/UFPB e Engenharia de Produção/UFCG.

Além do desenvolvimento de pesquisa em si, vislumbra-se a formação de recursos humanos. Do ponto de vista didático, ao final deste projeto trabalho espera-se que os alunos de graduação e pós-graduação acumulem conhecimentos sobre a oferta brasileira de bioeletricidade sucroenergética; além de ter experiência com alguns métodos e indicadores de caracterização e avaliação de mercado. Do ponto de vista científico, esse estudo dará subsídios para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, aliado associado às estratégias na geração de energia mais limpa. Satisfazendo não somente desafios das demandas dos setores produtivos, como também, fazendo o uso planejado e eficiente dos recursos naturais e promovendo um crescimento econômico mais holístico e sustentável.

Diante do exposto e como fruto dos resultados parciais do projeto N 057-2023, o objetivo deste estudo foi apresentar uma metodologia para analisar a distribuição e a dependência espacial da bioeletricidade sucroenergética no Brasil para 2024. Esta abordagem é inovadora e deve explicar as mudanças ocorridas na geração energética regional e a evolução do uso deste recurso, além de se estabelecer como referencial para investigações futuras em distintas regiões. Os resultados contribuirão na orientação de políticas públicas e a tomada de decisão, colaborando na formulação e implementação de

estratégias para segurança energética da matriz elétrica brasileira e descarbonização da economia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Objeto de estudo

As informações de outorga das termelétricas de biomassa do Brasil estão disponíveis nos Sistema de Informações da Aneel (SIGA) da ANEEL, sendo utilizados os dados de 02 de maio de 2024. As usinas utilizadas formam de biomassa agroindustrial, advindo da cana-de-açúcar (termelétricas sucroenergéticas). Os dados de estimativas de população foram extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para o ano de 2021 (IBGE, 2023). Realizou-se uma análise de conjuntura das usinas de geração de eletricidade do Brasil, observando-se a distribuição por fontes (biomassa, eólica, solar, hidráulica, fóssil e nuclear), para a potência outorgada e número termelétricas em operação, em 2024. Também se avaliou a distribuição espacial das termelétricas sucroenergéticas deste período.

2.2 Análise exploratória de dados espaciais

A avaliação da autocorrelação espacial e a verificação de instabilidades espaciais e a identificação de outliers, pode ser realizada a partir da análise exploratória de dados espaciais (AEDE). Usualmente, as análises de dados associados a regiões geográficas implicam na identificação de resíduos autocorrelacionados positivamente, ou seja, resíduos altos agrupando-se em uma mesma região (COELHO JUNIOR et al., 2018; JING e CAI, 2018). A autocorrelação espacial representa o quanto uma dada variável da região i (potência outorgada da bioeletricidade ou quantidade de geradores) encontra-se relacionada com a mesma variável em uma região vizinha j . Para este trabalho foram considerados como unidades espaciais os estados com usinas termelétricas da biomassa (nível; assim, cada estado representou uma unidade territorial. Para verificar o padrão espacial foi construída a matriz de ponderação W , composta por elementos binários para a avaliação da contiguidade (COELHO JUNIOR et al., 2018).

$$\begin{cases} w_{ij}=1 & \text{se a observação } i \text{ é vizinha da observação } j \text{ e;} \\ w_{ij}=0 & \text{se a observação } i \text{ não é vizinha da observação } j. \end{cases}$$

Para contiguidade foi escolhida o tipo: rainha (queen), conforme modelo na Figura 1. Esta matriz pode ser classificada em de primeira ordem (vizinhos diretos das regiões), de segunda ordem (vizinhos dos vizinhos das regiões), de terceira ordem e demais associações (ANSELIN, 2003). Neste estudo foram considerados apenas os vizinhos de primeira ordem.

Indicadores de Autocorrelação espacial

A autocorrelação espacial global (I_{Moran_Global}) é uma medida de correlação avaliada testando a hipótese nula em locais aleatórios (ANSELIN, 2003). Druck et al. (2004) afirmam que a caracterização da dependência espacial permite a identificação de resultados significativos em uma região, que é o foco principal da análise espacial. A função utilizada para medir o impacto das diferentes variáveis em uma região, depende do seu valor na região vizinha, ou seja, há uma autocorrelação espacial; para mensuração desta autocorrelação utilizou o índice global de Moran (I_{Moran_Global}) (Equação 1).

Figura 1 - Representação da matriz de contiguidade rainha (R).

		R		

Fonte: Adaptado de Coelho Junior et al. (2018).

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

onde, n = número de termelétricas ou potência outorgada da biomassa sucroenergética, W_{ij} = valor da matriz de ponderação, Y_i = número de termelétricas ou potência outorgada da bioeletricidade sucroenergética (i); Y_j = número de termelétricas ou potência outorgada da bioeletricidade sucroenergética o ponto j ; \bar{Y} = media do número de termelétricas ou potência outorgada da bioeletricidade sucroenergética na região de estudo.

Para variáveis espacialmente independentes, ou seja, sem autocorrelação, o valor de I_{Moran_Global} é zero. Quando as variáveis são espacialmente dependentes, poderá ser apresentada padrão de 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 são apresentados em um diagrama de espalhamento (Figura 2). A interpretação do diagrama indica que para elevado número de geradores ou potência outorgada, com vizinhança alta tem-se o padrão AA (Alto – Alto), enquanto baixos valores, 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 5% (p-valor $\leq 0,05$).

I_{Moran_Local} (I_{Moran_Local}) é utilizado que há muitas observações na área de estudo resulta na alta probabilidade de alto correção espacial em diferentes pontos. Embora o índice I_{Moran_Global} seja importante em termos de mostrar a integração dos dados globais, este índice deve ser apoiado por estatísticas locais (DRUCKER et al., 2004). Segundo Anselin (2003), I_{Moran_Local} (Equação 2) reúne as condições para definição da estrutura de correlação para cada área da área de pesquisa, sendo complementar ao índice de correlação espacial global. A soma do indicador local para cada observação é proporcional ao indicador de correlação espacial global.

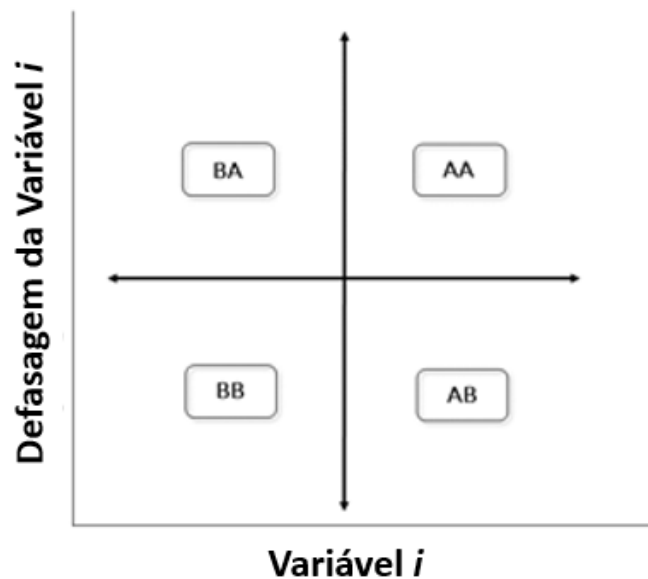
$$I_{Moran_Local} = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

n

onde, n = número de termelétricas ou potência outorgada da biomassa sucroenergética, W_{ij} = valor da matriz de ponderação, Y_i = número de termelétricas ou potência outorgada da bioeletricidade sucroenergética (i); Y_j = número de termelétricas ou potência outorgada da bioeletricidade no ponto j ; \bar{Y} = média do número de termelétricas ou potência outorgada da bioeletricidade na região de estudo

Assim como para o diagrama de dispersão do I_{Moran_Global} , os valores positivos do I_{Moran_Local} significam que existem clusters espaciais com padrões semelhantes (alto ou baixo) para a variável observada. Valores negativos significam que existem clusters espaciais com valores opostos da variável entre as áreas e seus vizinhos, alto-baixo ou baixo-alto (SILVA et al., 2011).

Figura 2 - Diagrama de dispersão de Moran.



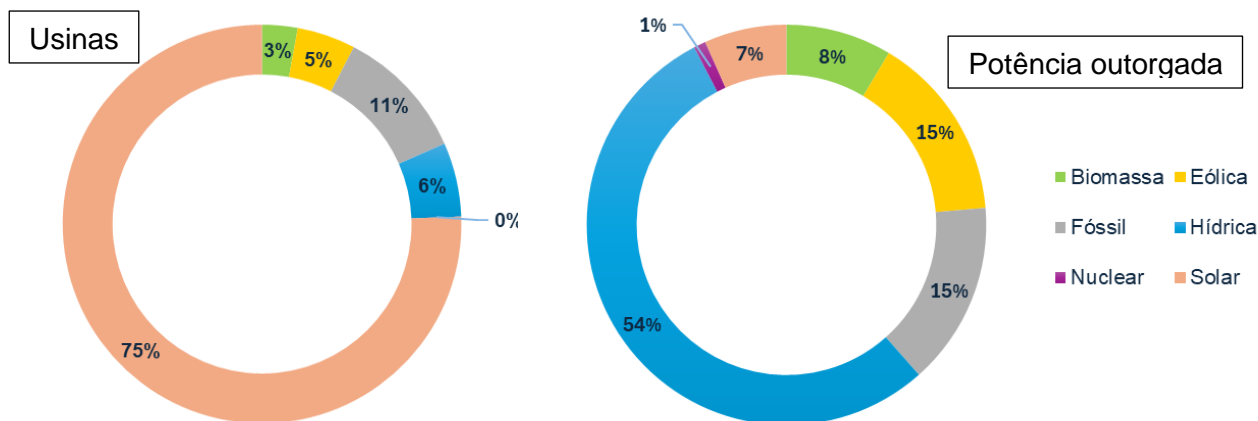
Fonte: Adaptado de Coelho Junior et al. (2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta Participação das usinas em operação por tipo fonte na matriz elétrica brasileira, em termos de quantidade e potência outorgada, para 2024. No total de usinas em operação foram contabilizadas 22.122 unidades e isto se deve, principalmente, pela descentralização oferecida com a geração fotovoltaica (PV) de baixa e média tensão. A PV deteve 16.723 sistemas grids, o que corresponde 75% das usinas, seguida pelos combustíveis fósseis, com as termelétricas de óleo diesel e gás natural. A região Norte teve a maior participação, em razão de que parte desta região não participa do Sistema Integrado Nacional (SIN). O Pará foi o estado que registrou ter mais usinas, pequenos geradores, junto ao banco de dados da ANEEL e seguida esteve a região Centro-Oeste. Estão em operação 203,84 GW, dos quais a maior geração foi a energia hidráulica com 109,87 GW, em seguida estiveram a Eólica e os combustíveis fósseis com 15% cada e a biomassa ficou em quarto lugar (8%). Para a biomassa a geração é centralizada em usinas com maior potencial de geração, a exemplo das usinas de cana-de-açúcar, ou das indústrias da madeira, que utilizam do licor negro (segmento de papel e celulose) e de resíduos florestais (serrarias). Para potência instalada destacam-se as regiões Sudeste e Sul do Brasil, como apresentado por Santos Júnior et al. (2022a). Para 2024, 54,10% da

oferta de potência da biomassa esteve no Sudeste, com especial participação do estado de São Paulo. Assim como para potência instalada, o número de geradores também foi superior nesta região (327 empreendimentos).

Figura 3 – Participação das usinas em operação por tipo fonte na matriz elétrica brasileira, em termos de quantidade e potência outorgada, para 2024.

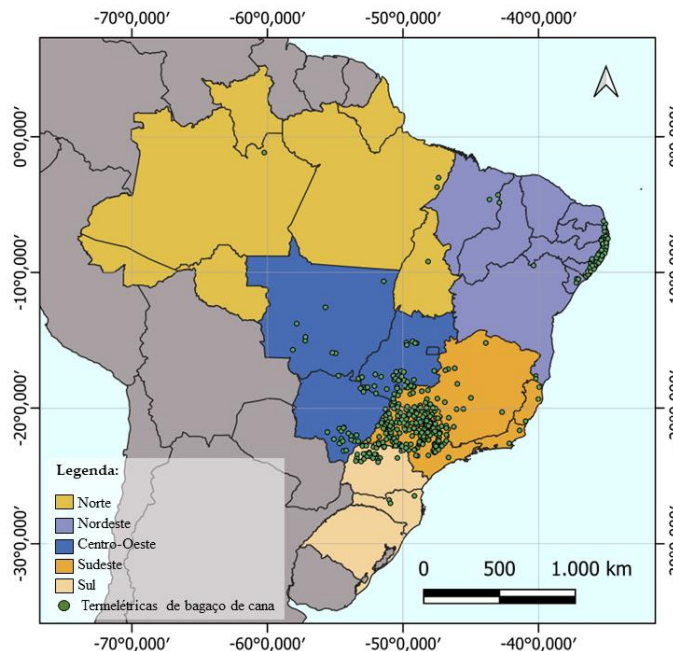


Fonte: Autores (2024).

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial das termoelétricas sucroenergética no Brasil em operação para 2024. No Brasil estão em operação 423 usinas com uma potência instalada de 12,5 GW, sendo que 61,94% (262) dessas térmicas estão no Sudeste que responde a 64,27% (8,04 GW) da potência instalada. Na segunda posição vem o Centro-Oeste com 69 usinas (16,31%) e participando com 22,67% (2,84 GW) do potencial instalado, seguindo está Nordeste com 56 (13,24%) usinas e 0,9 GW (7,38%), o Sul com 32 (7,57%) e gerando 0,6 GW (4,82%) e por último vem a região Norte com 0,95% (4) e uma oferta energética de 0,85% (0,11 GW). A oferta de eletricidade a partir da biomassa sucroenergética corresponde a características regionais e espaciais em razão das condições edafoclimáticas, custos de produção e logística (HERMÁNDEZ; JAEGER; SAMPERIO, 2018). A análise exploratória de dados espaciais é indispensável para compreender como os aspectos de localização interferem na oferta de bioeletricidade do Brasil.

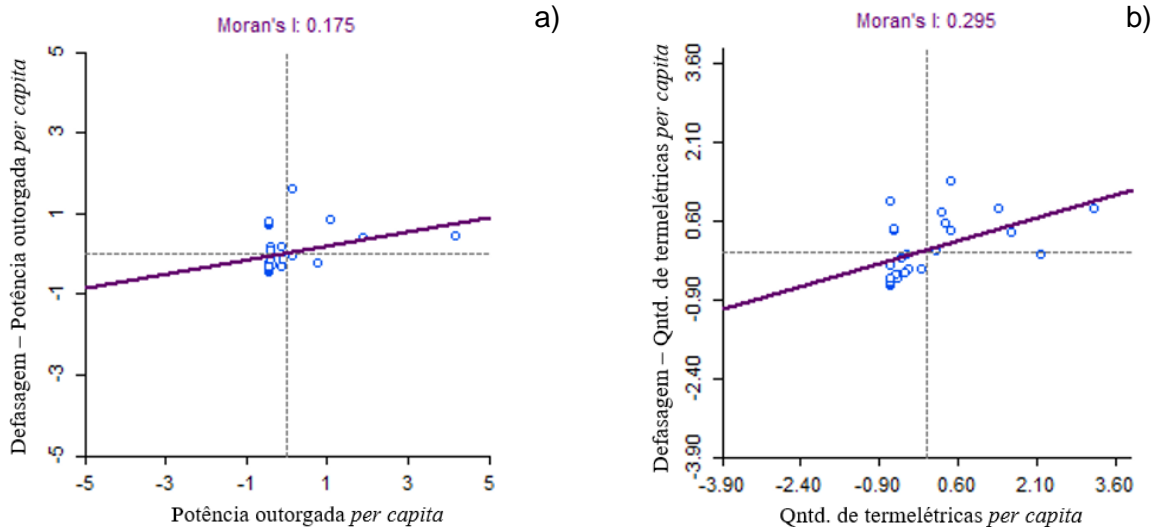
A Figura 5 apresenta o diagrama de dispersão do I_{Moran_Global} e a distribuição espacial do I_{Moran_Local} da potência outorgada (KiloWatts - kW) nas termelétricas sucroenergética no Brasil, considerando a matriz rainha, para o ano de 2024. O I_{Moran_Global} (Figura 5.a) indicou uma leve associação espacial positiva para a oferta de bioeletricidade *per capita* no território brasileiro, com índice de 0,175, o que indica que não há um padrão espacial característico para toda a região de estudo. A Figura 5.b apresentou o índice global para a quantidade de usinas *per capita*, com valor de 0,295; embora tenha mostrado haver maior associação, os efeitos espaciais constatados não foram muito significativos. Essa leve tendência foi mais bem observada pelo índice local, a Figura 6 apresenta a distribuição espacial do I_{Moran_Local} para a potência outorgada *per capita*, nas termelétricas sucroenergética no Brasil, em 2024. Para o menor nível de significância, $p\text{-valor} = 1\%$, apenas o estado do Amazonas foi registrado como de baixa oferta, cercado por vizinhança das mesmas características. A região Norte do país apresenta a geração centralizada na biomassa florestal de alta oferta na região centro sul do país. Santos Júnior et al. (2022a) inferiram uma alta concentração na oferta energética a partir de resíduos florestais, em diversos estados, com destaque para a região Norte.

Figura 4 – Distribuição espacial das termoelétricas sucroenergética no Brasil em operação para 2024.



Fonte: Autores (2024).

Figura 5 – Diagrama de I_{Moran_Global} para a potência outorgada *per capita* (a) e quantidade termelétricas *per capita* (b), da bioeletricidade sucroenergética no Brasil, em 2024.

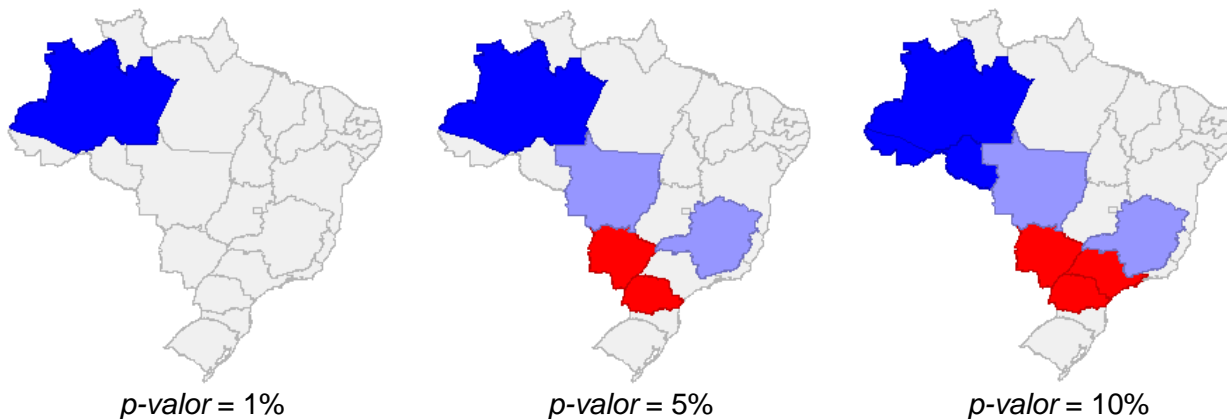


Fonte: Autores (2024).

Para o nível de significância de 5% observou-se um agrupamento de alta entre os estados do Mato Grosso do Sul e Paraná, com vizinhança de baixa para o Mato Grosso e Minas Gerais, é importante ressaltar que o estado mineiro apresentar grande participação na oferta, todavia em termos *per capita* esse percentual Para os 10% um cluster é então formado, o padrão AA englobou São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, o estado do Sudeste, destaca-se pela a oferta a partir da cana-de-açúcar na porção noroeste do estado. Ogura et al. (2022) apontam que geração de bioeletricidade tem crescido significativamente na região o noroeste e o oeste de São Paulo. Com o aumento do nível de significância houve a formação de cluster do tipo baixo-baixo no Norte, o que evidencia baixa utilização

do recurso no restante do país. A região Nordeste não apresentou nenhum padrão de autocorrelação espacial, os estados do Nordeste destacam-se pelo litoral, com grande oferta a partir da cana-de-açúcar (SANTOS JÚNIOR et al., 2023).

Figura 6 – Distribuição espacial de I_{Moran_Local} para a potência outorgada *per capita* da bioeletricidade sucroenergética no Brasil, em 2024.



Legenda: ■ Baixo – Baixo ■ Baixo – Alto ■ Alto – Alto ■ Alto – Baixo □ Sem associação
Fonte: Autores (2024).

Como para a potência per capita, o aumento do nível de significância fez com que se tornasse evidente o cluster de alta para a quantidade de geradores *per capita*, Figura 7, a partir da biomassa sucroenergética. Assim, também se observou um cluster de alta na região centro-sul, onde participaram os estados de São Paulo (209 termelétricas), Minas Gerais (48 termelétricas), Paraná (29 termelétricas), e Mato Grosso do Sul (24 termelétricas), assim como para a potência outorgada, as características de fortes indústrias na região justificam a existência dos clusters. Garcia e Sperling (2017) esclarecem que estes estados se destacam por suas vantagens comparativas, em especial o clima, que transforma a área na mais produtiva para cana, no país.

Figura 7 – Distribuição espacial de I_{Moran_Local} para a quantidade de termelétricas *per capita* da bioeletricidade sucroenergética no Brasil, em 2024.



Legenda: ■ Baixo – Baixo ■ Baixo – Alto ■ Alto – Alto ■ Alto – Baixo □ Sem associação
Fonte: Autores (2024).

No Brasil, os principais riscos para investimentos na bioeletricidade sucroenergética estão na seleção adequada de locais, licenciamento e conexão à rede, para áreas isoladas. A análise do padrão espacial da bioeletricidade sucroenergética outorgada pode auxiliar ao plano de desenvolvimento energético brasileiro, o qual demanda novos projetos e desenhos de negócios que facilitem a viabilidade técnico-econômica dos sistemas, indicando áreas com maior desenvolvimento regional e tecnológico para essa forma de geração e, conseqüentemente, reduzindo os riscos de investimentos (SANTOS JÚNIOR et al., 2022b).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise de conjuntura observou-se a biomassa como quarta maior fonte outorgada do país, entre as renováveis, sendo os estados do Sudeste e Sul do Brasil os com maior participação.

O I_{Moran_Global} indicou pequena autocorrelação espacial para a potência outorgada a partir da biomassa sucroenergética, sendo um pouco maior para a quantidade de geradores de eletricidade a partir dessa fonte.

O índice local (I_{Moran_Local}) evidenciou a existência de clusters de alta capacidade outorgada e número de geradores, sendo os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná e Minas Gerais o agrupamento mais forte para essa oferta no país.

O conhecimento do padrão espacial do setor de bioeletricidade sucroenergética, apresentado neste estudo, pode contribuir no entendimento da dinâmica de geração e auxilia investidores e formuladores de políticas na tomada de decisão quanto a localização e implementação de novos empreendimentos. Assim como, na formação de recursos humanos voltados para engenharia do nordeste brasileiro, nos níveis de graduação e Pós-graduação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (nº 310871/2021-2 e nº 309452/2021-0) e pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC e o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba - FAPESQ - Projeto N 057-2023.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração.**

Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 12 mai. 2024.

ANSELIN, L. Spatial econometrics: methods and models. **Springer Science & Business Media**, 1988.

ANSELIN, L. Spatial Externalities, Spatial Multipliers, and Spatial Econometrics. **International Regional Science Review**, v. 26, n. 2, p. 153-166, 2003.

CABRAL, J.D.A; *et al.* Electricity consumption forecasting in Brazil: A spatial econometrics approach. **Energy** 2017, 126, 124–131.

COELHO JUNIOR, M. L. *et al.* Spatial distribution of firewood production in northeastern Brazil (1994-2013). **Revista Árvore**, v. 42, n.4, p. e420402, 2018.

DRUCK, S. *et al.* **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planautina, DF, EMBRAPA Cerrados, 2004. 209 p.

DUNN, L. N. *et al.* Exploratory analysis of high-resolution power interruption data reveals spatial and temporal heterogeneity in electric grid reliability. **Energy Policy**, v. 129, p. 206-214, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) 2023: Ano Base 2022, **Balço Energético Nacional**, Rio de Janeiro, Brasil, 2023, p. 36.

FREITAS, W. W, *et al.* Exploratory spatial analysis for interval data: A new autocorrelation index with COVID-19 and rent price applications. **Expert Systems with Applications**, v. 195, p. 116561, 2022.

GARCIA, J. C. C.; VON SPERLING, E. Greenhouse gas emissions from sugar cane ethanol: Estimate considering current different production scenarios in Minas Gerais, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1033-1049, 2017.

HERNÁNDEZ, U. F. *et al.* Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. **Sustainable**, v. 10, n. 4, p. 1–19, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da População**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>. Acessado em: 14 de maio de 2024.

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.

LI, L. *et al.* Coupling coordination degree spatial analysis and driving factor between socio-economic and eco-environment in northern China. **Ecological Indicators**, v. 135, p. 108555, 2022.

MILANEZ, A.Y. *et al.* **Panoramas Setoriais 2030 Sucrenergético**. BNDES 2020.

Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14245/2/Panoramas%20Setoriais%202030%20-%20Sucrenerg%C3%A9tico_P_BD.pdf. Acessado em: 14 de maio de 2024.

NUNES, A. M. M. *et al.* Public Policies for Renewable Energy: A Review of the Perspectives for a Circular Economy. **Energies**, v. 16, p. 485, 2023.

OGURA, A. P. *et al.* An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last two decades and its environmental impacts. **Sustainable Production and Consumption**, v. 32, p. 66-75, 2022.

SANTOS JÚNIOR, E. P. *et al.* Potentialities and Impacts of Biomass Energy in the Brazilian Northeast Region. **Energies**, v. 16, p. 3903, 2023.

SANTOS JÚNIOR, E. P. *et al.* Location and concentration of the forest bioelectricity supply in Brazil: A space-time analysis. **Renewable Energy**, v. 199, p. 710-719, 2022a.

SANTOS JÚNIOR, E. P. *et al.* Forest Bioelectricity in Brazil: Distribution and Spatial-Time Dependence. **IEEE Access**, v. 10, p. 132822-132835, 2022b.

SILVA, N. C. N. *et al.* 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.

SZARUGA, E. *et al.* Convergence of Energy Intensity of the Export of Goods by Rail Transport: Linkages with the Spatial Integration and Economic Condition of Countries. **Energies**, 16(9), 3823, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16093823>

TEDESCO, M. *et al.* Assessment of the circular economy in the Brazilian planted tree sector using the ReSOLVE framework. **Sustainable Production and Consumption**, p. 397-406, 2022.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA – ÚNICA. Bioeletricidade gerada com bagaço cresce 14% em 2023. 2024 Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/bioeletricidade-gerada-com-bagaco-e-palha-cresce-14-em-2023/>. Acessado em: 14 de maio de 2024.

ZHANG, X. *et al.* Spatial characteristics and its driving factors of low-carbon energy technology innovation in China: A gravity movement and exploratory spatial data analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126481, 2021.

DISTRIBUTION AND SPATIAL DEPENDENCE OF BRAZILIAN SUGAR-ENERGY BIOELECTRICITY

ABSTRACT

Bioelectricity is a type of electricity generated by burning biomass, which comes from organic matter of plant or animal origin. This article analyzed the distribution and spatial dependence of sugarcane bioelectricity in Brazil for 2024. The data was obtained from the Generation Information System of the National Electric Energy Agency (ANEEL). Exploratory spatial data analysis was used to assess spatial dependence using the global and local Moran index. The main results show that biomass is the country's fourth largest licensed source. The IMoran_Global indicated little spatial autocorrelation for the power granted, and slightly more for the number of electricity generators using this source. The local index (IMoran_Local) showed the existence of clusters of high licensed capacity and number of generators, with the states of São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná and Minas Gerais being the strongest grouping for this supply in the country. It is concluded that knowledge of the spatial pattern of the sugar-energy bioelectricity sector, presented in this study, can contribute to understanding the dynamics of generation and help investors and policymakers make decisions about the location and implementation of new projects. As well as, in the training of human resources focused on engineering in northeastern Brazil, at undergraduate and postgraduate levels.

Keywords: Renewable energy; Bioenergy; Regional economy; Market study.

