



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



CLARISSE FREIRE BARBOZA MAURÍCIO

**ESTRUTURA DE MERCADO E EFEITO ESPAÇO-
TEMPORAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA**

JOÃO PESSOA - PB
2024

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 112

CLARISSE FREIRE BARBOZA MAURÍCIO

**ESTRUTURA DE MERCADO E EFEITO ESPAÇO-TEMPORAL DA GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA**

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 energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA - PB
2024**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M455e Maurício, Clarisse Freire Barboza.

Estrutura de mercado e efeito espaço-temporal da
geração distribuída fotovoltaica na Paraíba / Clarisse
Freire Barboza Maurício. - João Pessoa, 2024.
205 f. : il.

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

1. Energias renováveis. 2. Transição energética. 3.
Economia de baixo carbono. 4. Economia regional. 5.
Economia espacial. I. Coelho Junior, Luiz Moreira. II.
Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)

CLARISSE FREIRE BARBOZA MAURÍCIO

**ESTRUTURA DE MERCADO E EFEITO ESPAÇO-TEMPORAL DA GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA**

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 28 de fevereiro de 2024.

Prof. Dr. Adriano Firmino Valdevino de Araújo

CCSA-UFPB



Prof^ª. Dr^ª. Camila Serbel Gehrke

CEAR- UFPB

Prof^ª. Dr^ª. Daniela Carla Decaro Schettini

IRI-USP



Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

**JOÃO PESSOA - PB
2024**

“Palavras são, na minha nada humilde opinião, nossa inesgotável fonte de magia. Capazes de causar grandes sofrimentos e, também, de remediá-los.”

Alvo Dumbledore

À minha mãe Bisneta que sempre presente,
me apoiou e amou incondicionalmente.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai, Filho e Espírito Santo por ser meu amparo em todos os momentos. À Maria, virgem e mãe, por ter intercedido e me protegido. À minha avó Dona Zizi (*In memoriam*) por ter sido exemplo de mulher de fé.

À minha mãe Bisneta por ser minha maior incentivadora. Ao meu noivo Erivelton por todo amor, cuidado, incentivo e apoio. Ao meu pai Vitor por sempre acreditar em mim. Ao meu padrasto Damásio pela força e suporte. A minha tia-avó Neves pelo amor e suporte incondicional.

Ao meu irmão de consideração Nivaldo por sempre incentivar e nunca duvidar da minha capacidade. À minha prima Laís pela amizade e palavras de conforto. À todos os familiares pela força em momentos de incerteza, em especial, Graça, Lúcia, Everalda, Luzia Ana Maria, Ariana e Cristiane. Aos amigos Rakel, Larissa, Tarciana, Luís, Virna e Rafaela pelo amor e companheirismo.

À Universidade Federal da Paraíba pelo conhecimento adquirido e ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis pela oportunidade. Ao professor Luiz Moreira Coelho Junior pela orientação, amizade e incentivo à academia. A todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica, de forma direta ou indireta.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ Brasil) pelo apoio financeiro do Projeto nº 09/2021 “Avaliação sistêmica da energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba”.

Às amigas Gabriela, Marcela e Juliana pelo companheirismo desde o ensino médio. Aos amigos Luis Felipe e Marcus Vinícius, pela amizade desde a graduação. Aos amigos Josicleide, Victor, Eline, Emanuelle, Rosa, Sidnéia, Liane e Josemar pela camaradagem durante a pós-graduação. A Edvaldo, por todo suporte e exemplo.

Por fim, a todos que contribuíram para que fosse possível a realização deste sonho.

RESUMO

A energia solar, convertida da radiação solar em eletricidade ou calor, é uma fonte renovável e sustentável. Esta dissertação analisou a estrutura de mercado e o efeito espaço-temporal da geração distribuída fotovoltaica na Paraíba. Mais especificamente, localização, distribuição e concentração da potência instalada desta tecnologia no estado, de 2014 a 2021. Foram utilizados os dados de potência instalada da Geração Distribuída (GD) fotovoltaica, em quilowatt (kW), obtidos junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As metodologias abordadas constituíram a revisão sistemática de literatura, os indicadores de concentração, a análise exploratória de dados espaciais, a cadeia espacial de Markov e a estatística Scan. Os resultados principais destacam que, na revisão sistemática da literatura, há uma predominância de artigos que abordam políticas públicas para energias renováveis, com ênfase em análise espacial, já a economia circular emergiu significativamente apenas a partir do ano de 2020. No Brasil, a adoção da tecnologia fotovoltaica teve crescimento exponencial a partir de 2020, em 2021 totalizou 9.988 MW instalados, com um aumento de 156%, em relação a 2015. Na Paraíba teve capacidade instalada de 74 MW (2021) distribuídos nos 217 municípios. Para as análises exploratórias de dados espaciais teve a formação de cluster do tipo Alto-Alto na região semiárida da Paraíba. Já a cadeia espacial de Markov inferiu que os municípios do semiárido tiveram melhores desempenhos em relação aos demais, em virtude das condições edafoclimáticas e alta potência instalada per capita. O efeito espaço-temporal, observado pela estatística Scan, mostrou conglomerados na região semiárida e litorânea da Paraíba. Pode-se concluir que o desenvolvimento desta dissertação contribuiu para uma melhor compreensão espacial da GD fotovoltaica da Paraíba.

Palavras-chave: Energias renováveis, Transição energética, Economia de baixo carbono, Economia regional e espacial.

ABSTRACT

Solar energy, converted from solar radiation into electricity or heat, is a renewable and sustainable source. This dissertation analyzed the market structure and the spatio-temporal effect of photovoltaic distributed generation in Paraíba. More specifically, location, distribution and concentration of the installed power of this technology in the state, from 2014 to 2021. Data on the installed power of photovoltaic Distributed Generation (DG), in kilowatts (kW), obtained from the National Electric Energy Agency were used. (ANEEL). The methodologies addressed were the systematic literature review, concentration indicators, exploratory analysis of spatial data, the Markov spatial chain and Scan statistics. The main results highlight that, in the systematic literature review, there is a predominance of articles that address public policies for renewable energy, with an emphasis on spatial analysis, whereas the circular economy has emerged significantly only since 2020. In Brazil, the adoption of photovoltaic technology saw exponential growth from 2020 onwards, in 2021 it totaled 9,988 MW installed, an increase of 156% compared to 2015. In Paraíba it had an installed capacity of 74 MW (2021) distributed across 217 municipalities. For exploratory analysis of spatial data, an Alto-Alto cluster was formed in the semi-arid region of Paraíba. The Markov spatial chain inferred that the semi-arid municipalities had better performances compared to the others, due to the edaphoclimatic conditions and high installed power per capita. The spatio-temporal effect, observed by Scan statistics, showed conglomerates in the semi-arid and coastal region of Paraíba. It can be concluded that the development of this dissertation contributed to a better spatial understanding of photovoltaic DG in Paraíba.

Keywords: Renewable energies, Energy transition, Low carbon economy, Regional and spatial economy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
1.1	INTRODUÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	ARTIGO 1 – POLÍTICAS ENERGÉTICAS, ANÁLISE ESPACIAL E ECONOMIA CIRCULAR PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA REVISÃO... 16	
	RESUMO	16
	ABSTRACT	17
2.1	INTRODUÇÃO	18
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	20
2.2.1	Definição da amostra.....	21
2.2.2	Análise descritiva e de rede.....	22
2.2.3	Análise de conteúdo	23
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.3.1	Revisão Sistemática de Literatura sobre as Energias Renováveis	25
2.3.2	Energias renováveis sob a ótica das políticas públicas	30
2.3.3	Energias renováveis sob a ótica da economia circular.....	36
2.3.4	Energias renováveis sob a ótica da análise espacial.....	38
2.4	CONCLUSÃO	40
2.5	REFERÊNCIAS.....	41
3	ARTIGO 2 – ANÁLISE REGIONAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO BRASIL SOB OS ÍNDICES DE HOOVER E KRUGMAN. 52	
	RESUMO	52
	ABSTRACT	53
3.1	INTRODUÇÃO	54
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	56
3.2.1	Objeto de estudo.....	56
3.2.2	Medidas locais.....	57

3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.4	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	73
4	ARTIGO 3 – DISPARIDADES REGIONAIS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA, BRASIL	77
	RESUMO	77
	ABSTRACT	78
4.1	INTRODUÇÃO	79
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	81
4.2.1	Medidas locacionais e de concentração da economia espacial	81
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.4	CONCLUSÃO	96
	REFERÊNCIAS	97
5	ARTIGO 4 - DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA PARAÍBA	102
	RESUMO	102
	ABSTRACT	103
5.1	INTRODUÇÃO	104
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	106
5.2.1	Localização e caracterização da área de estudo	106
5.2.2	Objeto de estudo.....	106
5.2.3	Análise Exploratória de Dados Espaciais	108
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	112
5.4	CONCLUSÃO	123
	REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.
6	ARTIGO 5 – DINÂMICA REGIONAL VIA CADEIAS ESPACIAIS DE MARKOV PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA - BRASIL	128
	RESUMO	128
	ABSTRACT	129
6.1	INTRODUÇÃO	130
6.2	MATERIAL E MÉTODOS	132
6.2.1	Objeto de estudo.....	132

6.2.2 Cadeias Espaciais de Markov.....	132
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	135
6.4 CONCLUSÃO	151
REFERÊNCIAS	152
6.5 ANEXOS	155
7 ARTIGO 6 - ANÁLISE NO ESPAÇO-TEMPO DOS CONGLOMERADOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PARAÍBA, DE 2014 A 2020.....	160
RESUMO	160
ABSTRACT	161
7.1 INTRODUÇÃO	162
7.2 MATERIAL E MÉTODOS	164
7.2.1 Objeto de estudo.....	164
7.2.2 Estatísticas de verificação	164
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	166
7.4 CONCLUSÃO	176
7.5 REFERÊNCIAS.....	177
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	182
REFERÊNCIAS	184

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

A energia solar é reconhecida como uma fonte renovável e sustentável, que transforma a radiação eletromagnética do Sol em eletricidade (tecnologia fotovoltaica) ou calor (sistemas térmicos) (AMINI et al., 2024). Essa forma de energia é considerada mais segura, confiável e ambientalmente amigável em comparação aos combustíveis fósseis, com papel significativo na consecução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), notadamente o 7 - ODS. Este ODS prioriza o acesso universal a energia segura, sustentável e limpa para todos. A energia solar, sendo uma fonte inesgotável, apresenta-se como uma alternativa capaz de atender à demanda de energia de forma eficiente, com baixas emissões de carbono (ELAVARASAN et al., 2021; QIAN et al., 2021).

O avanço da tecnologia fotovoltaica é atribuído a fatores positivos, com vantagens ambientais associadas. Estas vantagens incluem a não produção de resíduos líquidos ou sólidos, sendo uma opção acessível para aprimorar o fornecimento energético. Contribui para a diversificação da matriz elétrica e desempenha um papel crucial na redução da dependência das redes elétricas convencionais. Esta fonte energética torna-se mais acessível e atraente para consumidores e empresas com políticas de incentivos, subsídios e crédito tributários que estimulam o desenvolvimento econômico verde e impulsionam a inovação tecnológica (CORROCHER; CAPPÀ, 2020; LIU et al., 2022; SHAHSAVARI; AKBARI, 2018; SOVACOOOL et al., 2022). Até 2013, a Europa deteve 60% das instalações solares globais e a partir daí, a energia fotovoltaica se desenvolveu em diversas regiões do mundo. Em 2017, a China se consolidou como referência no mercado mundial fotovoltaico, com um terço capacidade instalada (POURASL; BARENJI; KHOJASTEHNZHAD, 2023).

De acordo com a *International Renewable Energy Agency - IRENA* (2023), a capacidade global instalada de energia solar fotovoltaica atingiu 880 GW, em 2022. A liderança pertenceu à China, que registrou uma capacidade instalada de 392 GW, seguida pelos Estados Unidos, com 111 GW, e pelo Japão, com 83 GW. O Brasil ocupou a oitava posição nesse *ranking*, apresentando uma capacidade instalada de 24 GW. O Atlas Solar Global (2021) mostrou que o potencial solar do Brasil (entre 3 e 6 kWh/m².dia de irradiação) tem níveis superiores aos países europeus, como Alemanha, França e Espanha, que possuem

capacidade instalada que ultrapassam o Brasil (SANTOS; LUCENA, 2021). O desenvolvimento desta fonte energética, no Brasil, é motivado pela diversificação da matriz elétrica brasileira, independência do sistema elétrico tradicional e acesso às regiões remotas brasileiras (DAVID et al., 2021; PAPAGEORGIOU et al., 2020).

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2022) e a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2022), em 2021, a energia solar fotovoltaica brasileira teve capacidade instalada de 14,5 GW, com 69% de geração distribuída - GD e 31% de geração centralizada. A EPE (2022) apresentou que a GD, em 2021, o Brasil teve 9,98 MW de capacidade instalada, distribuídos em 5.430 cidades e gerados por 866 mil sistemas. A região Sudeste esteve no topo do *ranking* da capacidade instalada, com 5,9 GW, seguida da região Sul (5 GW) e Nordeste (3,4 GW). Já os estados brasileiros que se destacaram foram Minas Gerais (1,5 GW), São Paulo (1,15 GW) e o Rio Grande do Sul (1,06 GW). A Paraíba ocupou a sétima posição no Nordeste e 18^a no Brasil, com capacidade instalada de 162,07 MW, distribuídos em 217 cidades e gerados por 12.845 sistemas.

A expansão do uso da tecnologia solar fotovoltaica tem papel crucial no desenvolvimento econômico regional e contribui na geração de empregos e renda do setor energético. A dinâmica econômica regional desempenha um papel fundamental ao caracterizar e otimizar atividades produtivas, identificando padrões e compreendendo a estrutura de mercado em um local específico e ao longo de determinado período. Sendo assim, são evidenciadas as influências das forças de mercado que delineiam a disposição e a estrutura geográfica de uma atividade econômica, impactando a concentração ou dispersão espacial (COMMENDATORE et al., 2022).

Para compreender as dinâmicas de distribuição geoespaciais da Geração Distribuída fotovoltaica, surge a análise espacial para identificar os padrões espaciais e áreas aglomeradas, a fim de compreender os fatores que influenciam sua dependência. A estatística espacial é uma ferramenta relevante na gestão e aprimoramento da utilização da tecnologia, levando em consideração as características edafoclimáticas específicas. Esta modalidade de estatística tem papel crucial no planejamento e otimização, pois considera dados geograficamente distribuídos, que podem se apresentar como padrões de pontos, superfícies contínuas ou informações agregadas por áreas (CARPIO-PINEDO et al., 2022; MORAIS; GOMES, 2021).

Considerando a importância da GD fotovoltaica no contexto brasileiro e, especificamente, na Paraíba, bem como a capacidade de geração elétrica associada a essa

modalidade, procurou-se compreender sua dimensão e distribuição da potência instalada. Para tal, foram empregadas técnicas de localização, concentração e distribuição espaço-temporal da potência instalada fotovoltaica distribuída tanto em nível nacional quanto estadual, concentrando-se na Paraíba.

No primeiro artigo, realizou uma revisão sistemática de literatura sobre as energias renováveis, sob a ótica das perspectivas das políticas energéticas, economia circular e análise espacial. A pesquisa abrangeu periódicos indexados na base *Web of Science*, no período de 2008 a 2022. O segundo artigo se concentrou na investigação da localização e concentração da distribuição da potência instalada e da potência populacional da Geração Distribuída (GD) fotovoltaica no Brasil, entre 2008 e 2022. Para quantificar a concentração do uso dessa tecnologia, foram empregados os Índices de Hoover (H) e Dessemelhança de Krugman (SI).

O terceiro artigo analisou a localização e concentração da potência instalada na Geração Distribuída (GD) fotovoltaica na Paraíba, durante o período de 2014 a 2021. Para avaliar a localização regional e concentração industrial, empregou-se os seguintes indicadores: Quociente Locacional (QL), Índice de Hoover (H), Índice de Dessemelhança de Krugman (SI) e Índice de Ellison-Glaeser (EG). O quarto trabalho dedicou-se ao estudo da dependência e distribuição espacial da GD fotovoltaica na Paraíba entre 2014 e 2021, utilizando a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE). O quinto artigo explorou a influência da vizinhança e o efeito de transbordamento das instalações de GD fotovoltaica na Paraíba entre 2014 e 2021, utilizando as Cadeias Espaciais de Markov. Para complementar essas análises, o último trabalho investigou os conglomerados espaço-temporais da GD fotovoltaica na Paraíba de 2014 a 2020. Este estudo identificou os períodos de existência dos clusters com base na estatística *Scan*, comparando esses resultados com o potencial de irradiação solar na Paraíba.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a estrutura de mercado e efeito espaço-temporal da geração distribuída fotovoltaica na Paraíba.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar uma revisão sistemática da literatura das energias renováveis sob a perspectiva das políticas energéticas, economia circular e análise espacial;
- b) Analisar a localização e concentração brasileira da Geração Distribuída fotovoltaica, no período de 2008 a 2021;
- c) Analisar a disparidade regional da Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, observando os efeitos locacionais e de especialização, de 2014 a 2021;
- d) Analisar a distribuição e dependência espaço-temporal da Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021;
- e) Analisar a dinâmica regional, por meio das cadeias espaciais de Markov, para Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021;
- f) Analisar os conglomerados espaço-temporais dos sistemas de Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, nos anos de 2014 a 2020.

2 ARTIGO 1 – POLÍTICAS ENERGÉTICAS, ANÁLISE ESPACIAL E ECONOMIA CIRCULAR PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA REVISÃO

RESUMO

Este estudo realizou uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) das energias renováveis sob a ótica das políticas energéticas, economia circular e análise espacial. Dos 69 artigos selecionados na amostra, observou os ciclos de políticas públicas (prévia, avaliação e prospecção) e seus tipos (políticas distributivas, redistributivas e regulação). Também verificou os princípios e premissas da economia circular e a análise espacial. Os resultados revelaram que os estudos tiveram início em 2008, com um aumento significativo em 2019. As publicações abrangem todos os continentes, destacando a China como o país com maior volume de contribuições. Na análise de políticas públicas, a etapa de prospecção teve 32 artigos que examinaram tendências energéticas globais e identificaram os fatores que influenciaram a distribuição das fontes renováveis. A economia circular foi abordagem recente no setor energias renováveis, emergindo ao final da década de 2010. As barreiras associadas à economia circular incluem altos custos de investimento no setor privado e falta de conscientização ambiental da população. Na análise espacial, os mapas de calor estiveram em 14 artigos, seguido pela autocorrelação espacial (I de Moran) com 12 ensaios. Conclui-se que a economia circular e análise espacial facilitam a orientação de políticas públicas para transição energética, tornando-as mais eficientes e produtivas, promovendo a sustentabilidade e segurança energética da matriz energética mundial.

Palavras-chave: Energia limpa, política energética, revisão sistemática de literatura.

**ARTICLE 1 – ENERGY POLICY, CIRCULAR ECONOMY AND SPATIAL
ANALYSIS FOR RENEWABLE ENERGY: A REVIEW**

ABSTRACT

This study carried out a Systematic Literature Review (SLR) of renewable energies from the perspective of energy policy, circular economy and spatial analysis. Of the 69 articles selected in the sample, public policy cycles (preview, evaluation and prospection) and their types (distributive, redistributive and regulation policies) were observed. It also verified the principles and assumptions of the circular economy and spatial analysis. The results revealed that studies began in 2008, with a significant increase in 2019. Publications cover all continents, highlighting China as the country with the largest volume of contributions. In the analysis of public policy, the prospecting stage had 32 articles that examined global energy trends and identified the factors that influenced the distribution of renewable sources. The circular economy was a recent approach in the renewable energy sector, emerging at the end of the 2010s. Barriers associated with the circular economy include high investment costs in the private sector and a lack of environmental awareness among the population. In the spatial analysis, heat maps were in 14 articles, followed by spatial autocorrelation (Moran's I) with 12 essays. It is concluded that the circular economy and spatial analysis facilitate the guidance of public policy for energy transition, making them more efficient and productive, promoting the sustainability and energy security of the global energy matrix.

Keywords: Clean energy, energy policy circularity, systematic literature review.

2.1 INTRODUÇÃO

As fontes renováveis emergem como ponto central da transição energética para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono (OLANIPEKUN et al., 2023). O progresso tecnológico energético continua ao longo de décadas, desempenhando um papel de enfrentamento aos desafios associados à consecução do desenvolvimento sustentável. Este avanço representa um compromisso com a busca pela descarbonização da economia, visando a neutralização das emissões de carbono. Recentemente, as energias renováveis vêm transformando as vantagens comparativas em competitivas em relação aos combustíveis fósseis, em aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais (LEE et al., 2023; LIN; HUANG, 2023; NCHOFOUNG et al., 2023).

A economia circular é um modelo econômico-ambiental que busca reduzir o desperdício e otimizar o uso dos recursos, com regeneração de sistemas naturais e redução ou eliminação de resíduos e poluição, com práticas circulares. Este modelo foca na redução, reutilização, reciclagem e recuperação dos recursos (CAMACHO-OTERO et al., 2018; PATWA et al., 2021). A integração das energias renováveis à economia circular contribui para sustentabilidade energética, minimizando a dependência dos recursos não-renováveis, facilitando a redução de resíduos e emissões (IOANNIDIS et al., 2023).

Sendo assim, a análise espacial desempenha um papel fundamental ao identificar oportunidades para otimizar a produção e distribuição de fontes renováveis, considerando fatores como localização geográfica, disponibilidade de recursos e infraestrutura existente. Este tipo de análise interpreta os padrões e relações geográficas dos eventos, na superfície, com técnicas e métodos para entender sua distribuição (GATTO et al., 2024). Além de identificar locais propícios para a implementação e otimização do potencial de fontes limpas, bem como na integração com a infraestrutura renovável existente, considerando variáveis geográficas (NUNES et al., 2023). Este tipo de análise fornece percepções e ferramentas importantes para o desenvolvimento, implementação e monitoramento de políticas públicas que tem o objetivo de garantir um suprimento energético seguro e acessível para todos.

As políticas energéticas são o conjunto de estratégias e ações do governo que promovem e gerenciam o consumo de energia de um recorte geográfico (SERMARINI et al., 2024). As atuais políticas governamentais mundiais estão cada vez mais alinhadas à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, focando na promoção do uso de fontes renováveis para a geração de eletricidade (JANKOWSKA et al., 2021; SIMPSON; CLIFTON, 2016). Wang et al. (2022) investigaram como o mercado de emissões de carbono

responde as diferentes frequências temporais de incertezas da política econômica na China. Granados e Spash (2019) avaliaram a eficácia das políticas na redução das emissões de CO₂, utilizando dados nacionais e estaduais dos Estados Unidos da América, de 1990 a 2015. Mahmood et al. (2020) exploraram o impacto do comércio, consumo de energia e emissões de CO₂ no Norte da África (Argélia, Egito, Líbia, Marrocos e Tunísia), de 1990 a 2014. Cifuentes-Faura (2022) concentrou-se nas principais políticas implementadas na União Europeia para mitigar problemas ambientais e abordou o cenário das conferências sobre alterações climáticas. Sheng et al. (2021) investigaram sobre as emissões de gases de efeito estufa no mercado de automóveis da Austrália e Nova Zelândia.

A revisão sistemática de literatura (RSL) pode ser vista como um caminho eficiente que analisa, de maneira crítica e imparcial, as informações ou conhecimentos relevantes. Configura-se como uma ferramenta capaz de investigar e examinar a produção científica, possibilitando avaliar sua eficácia e progresso, minimizando o viés, sendo ao mesmo tempo replicável e transparente. Há uma variedade de tipos de RSL, incluindo revisão bibliométrica, análise de conteúdo, meta-resumo, meta-narrativa, meta-análise e síntese interpretativa crítica (DAS et al., 2023; DONTU et al., 2021; MORAL-MUNOZ et al., 2020; XIAO; WATSON, 2019).

Foram incorporadas as perspectivas de estudos teóricos, como o trabalho de Ozoegwu e Akpan (2021), que realizaram uma revisão e avaliação dos objetivos e estratégias da política de energia solar na Nigéria, discutindo as motivações para um desenvolvimento mais amplo. Aldhshan et al. (2021) conduziram uma revisão da literatura sobre o consumo de energia global, com foco especial na Malásia, explorando o uso de métodos de Sistemas de Informação Geográfica (GIS) na avaliação espacial da eficiência energética. Suchek et al. (2021) realizaram uma revisão sistemática da literatura, buscando mapear os principais temas relacionados à inovação e economia circular, detalhando os fatores internos e externos envolvidos nos processos. Pascale et al. (2021) conduziram uma revisão sistemática da literatura para proporcionar uma visão abrangente dos índices relacionados à economia circular. Liu (2019) analisou criticamente os desafios nas legislações e políticas de energias renováveis na China, abordando questões de fragmentação e falta de operacionalidade. Martinez-Gordon et al. (2021) realizaram uma revisão de literatura, oferecendo uma visão global da resolução espacial em modelos energéticos, incluindo benefícios, desafios e direções para futuras pesquisas.

Neste artigo, realizou uma revisão sistemática de literatura com uma abordagem de análise quantitativa e técnica de mapeamento do conhecimento, com o intuito de explorar o progresso das energias renováveis sob as lentes da tríade: políticas energéticas, economia circular e análise espacial. A pesquisa buscou uma compreensão abrangente do desenvolvimento das energias renováveis para destacar abordagens internacionais relevantes e estabelecer limites conceituais. Os resultados desempenharão um papel fundamental como base para investigações subsequentes, proporcionando um suporte robusto para futuras pesquisas. Além disso, a abordagem inovadora adotada ao explorar a tríade associada às energias renováveis contribuirá para a expansão do conhecimento nesse domínio, fornecendo um suporte sólido de informações que poderá ser utilizado por outros pesquisadores e entidades públicas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é um método utilizado para reunir evidências relevantes sobre um tema específico, que atendam aos critérios pré-estabelecidos, para responder às questões de pesquisa formuladas (MENGIST et al., 2020). Essa abordagem não apenas visa avaliar e resumir, mas também comunicar os resultados e implicações das pesquisas, distinguindo-se das revisões exploratórias tradicionais por sua fundamentação em processos replicáveis, científicos e transparentes (ROTELLA JUNIOR et al., 2021).

A RSL das energias renováveis sob a ótica das políticas energéticas, economia circular e análise espacial selecionou dados acadêmicos, com delimitações, selecionou os termos de busca e fez uma triagem prática. Baseando-se em definições determinantes e pontos-chaves para a análise, todo material foi resumido a fim de obter resultados finais e achados úteis para a pesquisa (ZACHO; MOSGAARD, 2016).

Foram três etapas principais: (i) definição da amostra; (ii) análise descritiva e de rede (bibliometria); e (iii) análise de conteúdo. Na etapa ii utilizou a bibliometria como critério da RSL, por envolver a aplicação de técnicas quantitativas e estatísticas em dados bibliográficos (MUKHERJEE et al., 2022). Esta técnica mede e avalia, de forma quantitativa, o impacto da pesquisa sobre um tema, considerando as características passadas e pontos críticos no presente e sugerindo tendências de pesquisa no futuro (HERRERA-FRANCO et al., 2021). Na etapa iii, a análise de conteúdo, que consiste em uma estratégia de pesquisa sistemática para analisar dados obtidos ou gerados durante um estudo, sendo

aplicável em contextos qualitativos. Esta etapa explorou as variantes das interpretações, examinando os padrões e identificando significados subjacentes (TORTORELLA et al., 2022; WHITE; MARSH, 2006;).

2.2.1 Definição da amostra

A pesquisa por publicações foi conduzida nas bases de dados *Web of Science* (WoS) e *Scopus*. No entanto, devido à baixa quantidade de artigos na base *Scopus*, para as palavras selecionadas, optou-se por concentrar a análise exclusivamente na WoS. Esta base de dados foi consolidada e caracterizada por sua ampla cobertura de dados bibliográficos e citações, sendo reconhecidamente abrangente e confiável (NIÑEROLA et al., 2021).

Após realizar tentativas exploratórias, empregou-se os seguintes descritores de busca na base de dados, utilizando a lógica booleana "AND" e "OR" entre os níveis (1) e (2). O emprego do sinal (*) foi para abranger todas as variações do termo (ROTELLA JÚNIOR et al., 2021).

- (1) Solar energy or Renewable energy or energy transition + sustainable development objective or bioeconom* or SDG or ecolog* industr* or circular econom* + space time analysis or Econom* spatial or new econom* geography or regional econom*; e
- (2) Solar energy or Renewable energy or energy transition + energy polic* or public polic* + space time analysis or Econom* spatial or new econom* geography or regional econom*.

A definição da amostra está representada em um fluxograma, como mostra a Figura 2.1. Os descritores do tipo título devem estar incluídos no título, enquanto os descritores do tipo tópico devem ser incluídos no título, resumo ou palavras-chave. Os descritores da primeira pesquisa são do tipo tópico-tópico-tópico, já na segunda pesquisa são do tipo título-tópico-tópico, conforme descrito por Doile et al. (2021). Foram incluídos trabalhos com os atributos de termos no idioma inglês, o tipo de documento ser "artigo" ou "revisão" e a publicação ser até 2022. As publicações foram escolhidas com critérios de leitura do título e resumo, em seguida leitura dinâmica e completa dos trabalhos. Os artigos foram excluídos caso o tema principal não abordasse a energia solar ou focasse em outra fonte energética. Também foram retirados os trabalhos que não tem a abordagem das políticas energéticas, economia circular ou análise espacial das fontes renováveis. Os critérios de inclusão e

exclusão que foram utilizados no trabalho seguiram as métricas do estudo de Pires et al. (2021).

Figura 2.1. Fluxograma dos critérios de definição da amostra de artigos.

Critério	Resumo	Inclusão: Artigos diferentes Exclusão: Artigos iguais
	Idioma	Inclusão: Artigos em inglês Exclusão: Artigos em outras línguas
	Tipo de doc.	Inclusão: Artigos ou Artigos de revisão Exclusão: Todos os outros tipos
	Período	Inclusão: Artigos até 2022 Exclusão: Artigos de 2023
	Leitura de títulos	Inclusão: Artigos relacionados a energia solar Exclusão: Artigos com abordagens exclusivas de outras fontes renováveis
	Leitura de Abstracts	Inclusão: Artigos relacionados ao tema de pesquisa Exclusão: Dispositivos eletrônicos, engenharia elétrica e viabilidade econômica sistemas fotovoltaicos
	Leitura dinâmica	Inclusão: Artigos relacionados ao tema de pesquisa Exclusão: Dispositivos eletrônicos, engenharia elétrica e viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos
	Leitura completa	Inclusão: Artigos relacionados ao tema de pesquisa Exclusão: Dispositivos eletrônicos, engenharia elétrica e viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos

Fonte: Os autores (2024).

2.2.2 Análise descritiva e de rede

Na análise descritiva e de rede, realizou-se a caracterização dos dados bibliométricos, incluindo a evolução da quantidade de artigos, os periódicos mais citados, as palavras-chave mais frequentes e os países de origem, conforme Doile (2021). Os dados foram tabulados em planilha eletrônica e recortados para identificar os periódicos mais comuns e os artigos mais citados. De acordo com Danese e Goia (2021), foi elaborado um mapa global das publicações utilizando o *software* QGIS 3.26.3, com distribuição em quartis calculada pela Equação 2.1.

$$Q_k = \frac{k \sum f_i}{4} \quad (2.1)$$

em que, k = ordem do quartil; f_i = quantidade publicações por país.

Os dados e informações foram analisados minuciosamente para fornecer uma análise geral da amostra selecionada. Observou a evolução anual e acumulada das publicações e citações, além de classificar e categorizar os periódicos da amostra. Posteriormente, utilizou-se o *software VOSviewer*, baseado na pesquisa de Cavalcante et al. (2021), para elaborar o mapa de co-ocorrência entre 2018 e 2022, com a relação entre as palavras-chave da amostra, em que a cor azul representou as palavras-chave presentes em publicações mais antigas e a cor amarela em publicações recentes (KUZIOR; SIRA, 2022).

2.2.3 Análise de conteúdo

Esta etapa foi dedicada à interpretação dos resultados, sendo fundamental, uma vez que o objetivo da pesquisa é desenvolver uma estrutura integrada em uma ferramenta visual. Nessa fase, a análise concentra-se no conteúdo e no enquadramento. Devido à flexibilidade analítica proporcionada pela análise de conteúdo as energias renováveis foram analisadas sob a ótica das políticas energéticas, economia circular e análise espacial. Esta análise se baseou nos conceitos centrais de cada tema, categorizados e brevemente descritos (MORIOKA et al., 2018).

A análise espacial investiga, com técnicas e indicadores específicos, os padrões, processos, relações e distribuições geográficas das variáveis (GUPTA et al., 2024; ZHANG et al., 2024). Esta análise foi categorizada de acordo com os indicadores espaciais mais relevantes, destacando-se os indicadores de I de Moran, GIS e mapas de calor, que demonstram a distribuição dos recursos e áreas que necessitam de intervenção (BOEING et al., 2022). Os mapas de calor são considerados uma abordagem alternativa de visualização, representando uma variável no espaço por meio de cores mais quentes ou frias (ERSKINE et al., 2019). I de Moran mostra uma visão holística da heterogeneidade espacial presente na variável de interesse e são usados para fornecer visualizações de *clusters* espaciais (LUTZ, 2019). O Sistema de Informações Geográficas (GIS) é um sistema que captura, armazena, manipula, analisa e apresenta dados geográficos para compreensão de dados espaciais (FRANCH-PARDO et al., 2020).

As políticas públicas são ações planejadas do governo, com diretrizes para solucionar um problema social, econômico ou ambiental. As políticas energéticas desempenham papel importante na inovação e redução de custos das energias renováveis (TIWARI; SHARMA, 2022). Para as políticas energéticas deste trabalho foram examinadas as etapas do ciclo de políticas públicas: análise prévia, prospecção e avaliação da política, além de considerar a

fonte renovável abordada pelos autores. Esta classificação mostrou as ações governamentais e tendências que predominaram nas publicações da amostra selecionada. A análise prévia é a etapa que antecede qualquer decisão ligada à política pública e é um estudo que busca satisfazer os interesses coletivos da sociedade. A prospecção é sobre entender os problemas e revelar as diversas dificuldades que a política pública soluciona, além de mobilizar as bases de apoio político e implementar os processos para abastecer os recursos necessários para concretização das medidas das políticas. A fase de avaliação mostra os problemas e o motivos que eles precisam ser alterados com processos de acompanhamentos e avaliação dos programas implementados. Os trabalhos também foram classificados quanto ao tipo de política pública, de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Visão geral das categorias de políticas públicas correspondentes aos seus aspectos sociais

Categoria	Definição	Público-alvo
Distributiva	Objetivo de prestar serviços e/ou equipamentos estatais.	Pequenos grupos ou indivíduos de diferentes estratos sociais.
Redistributiva	Redistribuir receitas através do financiamento de serviços, equipamentos e alocar recursos.	As camadas mais altas da sociedade são responsáveis pelo financiamento.
Regulatória	Avaliar setores para criar padrões ou implementar serviços e equipamentos.	Toda sociedade.

Fonte: Nunes et al. (2023).

A economia circular é um modelo econômico e de produção que reduz a poluição e o desperdício dos recursos naturais, além de promover a sustentabilidade. Os materiais e produtos são utilizados pelo maior tempo possível, são recuperados e reintroduzidos na cadeia de produção, gerando um ciclo (IOANNIDIS et al., 2023). Quanto à economia circular, foram consideradas as bases teóricas do pensamento circular. Considerou-se o *design* regenerativo, metodologia para criar, aplicar, adaptar e integrar diversas tecnologias modernas para promover a evolução contínua da sustentabilidade. Também considerou a economia de performance que tem quatro objetivos principais: prolongar a vida útil do produto, produtos de longa duração, reparos e prevenção de resíduos. Por fim, a ecologia

industrial que traz o fluxo de materiais e energia por meio de sistemas industriais (SEHNEM et al., 2020).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

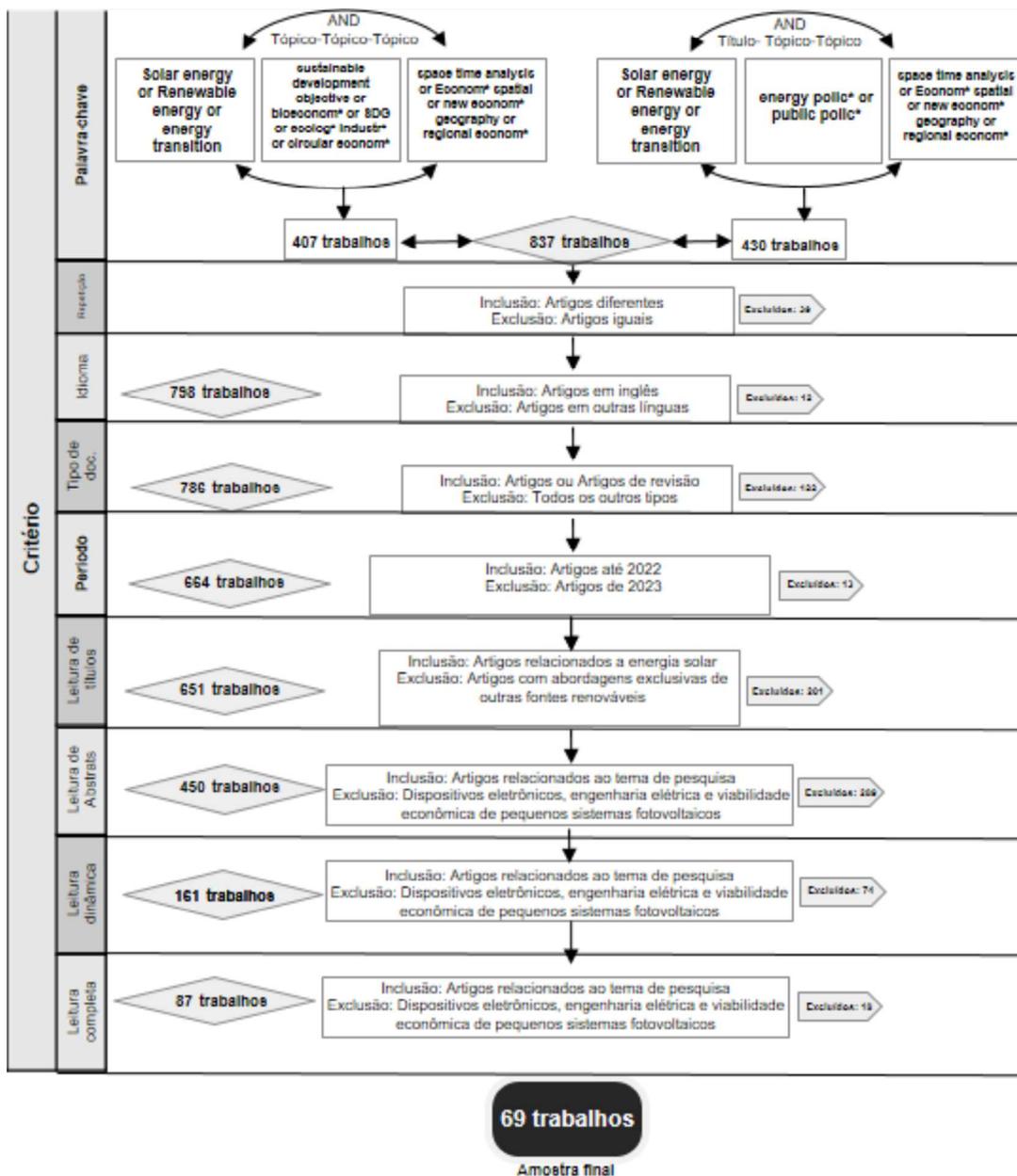
2.3.1 Revisão Sistemática de Literatura sobre as Energias Renováveis

A Figura 2.2 apresenta o fluxograma que delinea o processo de definição da amostra dos artigos analisados neste estudo. Inicialmente, após a determinação das palavras-chave, foram identificados 407 trabalhos na primeira pesquisa e 430 na segunda, totalizando 837 artigos. A aplicação do critério de repetição resultou na exclusão de 39 trabalhos duplicados, resultando em 798 artigos restantes. Posteriormente, ao adotar o critério de idioma, 12 trabalhos em línguas diferentes do inglês foram excluídos, reduzindo a amostra para 786 trabalhos.

Ao empregar o critério de tipo de documento, 122 trabalhos foram removidos, pois não se enquadraram na categoria de artigos ou artigos de revisão, resultando em uma amostra final de 664 artigos. A seguir, ao aplicar o critério de período e excluir 13 trabalhos que ultrapassaram o final de 2022, a amostra foi ajustada para 651 artigos. Posteriormente, durante a leitura dos títulos, 201 artigos foram eliminados por não estarem alinhados com o tema da pesquisa. Uma análise mais aprofundada dos resumos dos 450 trabalhos resultou na exclusão de 209 artigos que não atendiam ao escopo da pesquisa, resultando em 161 artigos. Uma leitura dinâmica desses trabalhos resultou na exclusão de 74 deles, deixando 87 artigos na amostra. Finalmente, uma leitura completa dos 87 artigos restantes levou à exclusão de mais 18 trabalhos, resultando em uma amostra final composta por 69 artigos.

A Figura 2.3 mostra a distribuição dos países no globo, de acordo com a quantidade publicações que trazem as energias renováveis sob os aspectos das políticas energéticas, economia circular e análise espacial e encontrou 32 países. O quartil superior foi formado pela China com 28 publicações, seguida dos Estados Unidos com 15 publicações, Reino Unido (Inglaterra, Irlanda do Norte, Escócia e País de Gales) com 7 publicações e Holanda, Índia e Itália com 4 trabalhos da amostra. A China está no topo do *ranking* e pode-se associar ao fato deste país ter sido um dos pioneiros da tecnologia solar, além de possuir a maior capacidade instalada na atualidade (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

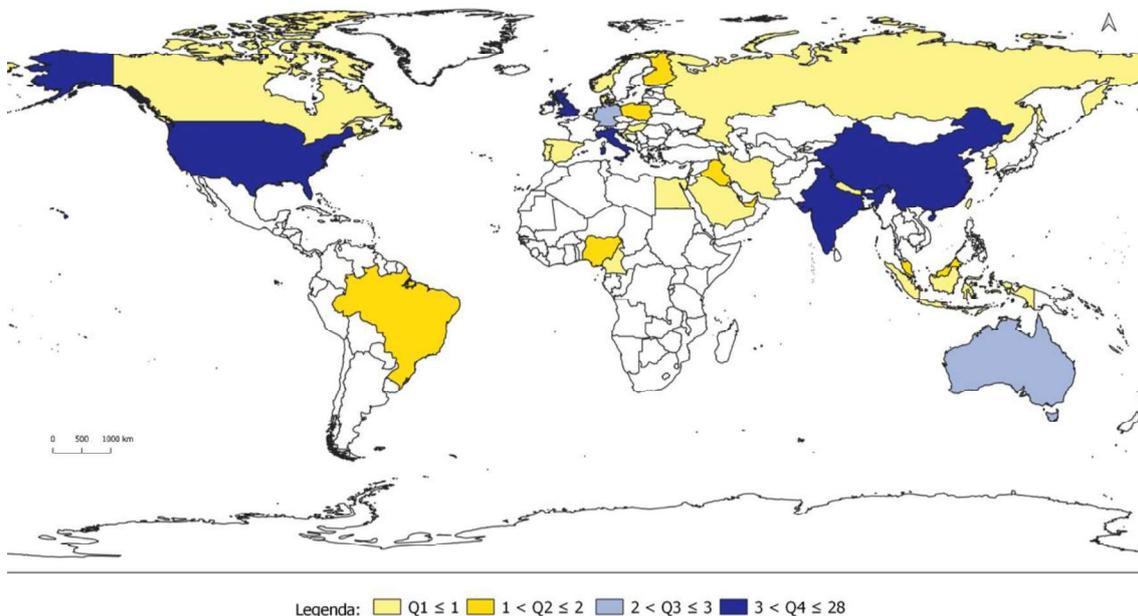
Figura 2.2 Esquema de amostragem para uma revisão sistemática da literatura sobre energias renováveis sob a ótica das políticas energéticas, economia circular e análise espacial.



Fonte: Os autores (2024).

Também foi observado que os países pertencentes a este quartil foram as nações com as maiores emissões de gases do efeito estufa, como China (12.295 MtCO₂e), Estados Unidos (5.289 MtCO₂e) e Índia (3.166 MtCO₂e). Em quarto lugar estava a União Europeia (2.957 MtCO₂e), representada pelos países Holanda, Itália e Reino Unido, conforme dados de 2020 (CLIMATE WATCH, 2020). Diante desse panorama, ficou nítido os esforços dos países em pesquisa e desenvolvimento renovável, por motivos econômicos e ambientais.

Figura 2.3. Distribuição espacial das publicações da amostra final, por quartis, dos países com publicações de energias renováveis sob as perspectivas políticas energéticas, economia circular e análise espacial, de 2008 a 2022.



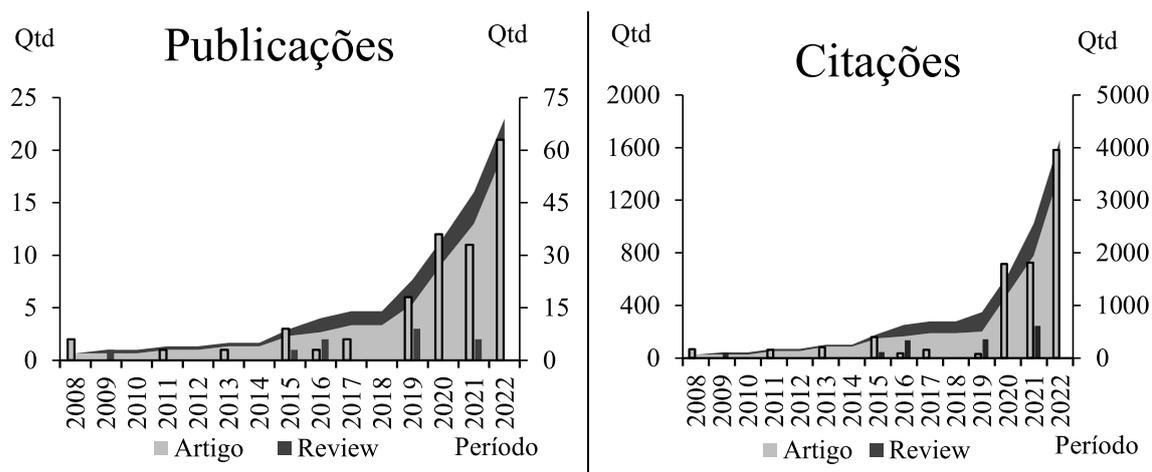
Fonte: Os autores (2024).

O terceiro quartil teve a Alemanha e Austrália com 3 publicações, o segundo quartil continha 7 países com 2 publicações, dentre eles, o Brasil e o primeiro quartil teve 17 países com apenas uma publicação. Observou a participação de todos os continentes, evidenciando o assunto abordado e sua relevância.

A Figura 2.4 mostra a evolução das publicações e das citações anuais das energias renováveis sob a perspectiva das políticas energéticas, economia circular e análise espacial, anual e acumulado, de 2008 a 2022. Os dois artigos mais antigos foram Lesser e Su (2008) e Zahran et al. (2008) que somaram 69 citações. O ano seguinte teve apenas Zhang et al. (2009) fazendo uma revisão das oportunidades e desafios da China para energias renováveis, com 41 citações. A partir de 2019, observou-se um incremento significativo no número de publicações, passando de 14 para 23, atingindo 69 trabalhos em 2022. Essas publicações tiveram 4.142 citações, refletindo notável interesse em explorar a interseção entre energias renováveis e as políticas energéticas, economia circular e análise espacial. Esse aumento expressivo de interesse destaca a importância crescente desses temas no contexto global. Isto ocorre pela urgência de compreender e promover abordagens integradas para enfrentar desafios ambientais e impulsionar a transição para práticas mais sustentáveis e eficientes no

âmbito das energias renováveis. Também há uma crescente necessidade por soluções sustentáveis pelos governos, empresas e organizações que podem ter estimulado este ramo da pesquisa para promover políticas públicas eficientes.

Figura 2.4. Evolução das publicações e citações dos artigos e revisões das energias renováveis sob a perspectiva das políticas energéticas, economia circular e análise espacial, anual e acumulado, de 2008 a 2022.



Obs. Qtd = Quantidade; Qtd ac = Quantidade acumulada.

Fonte: Os autores (2024).

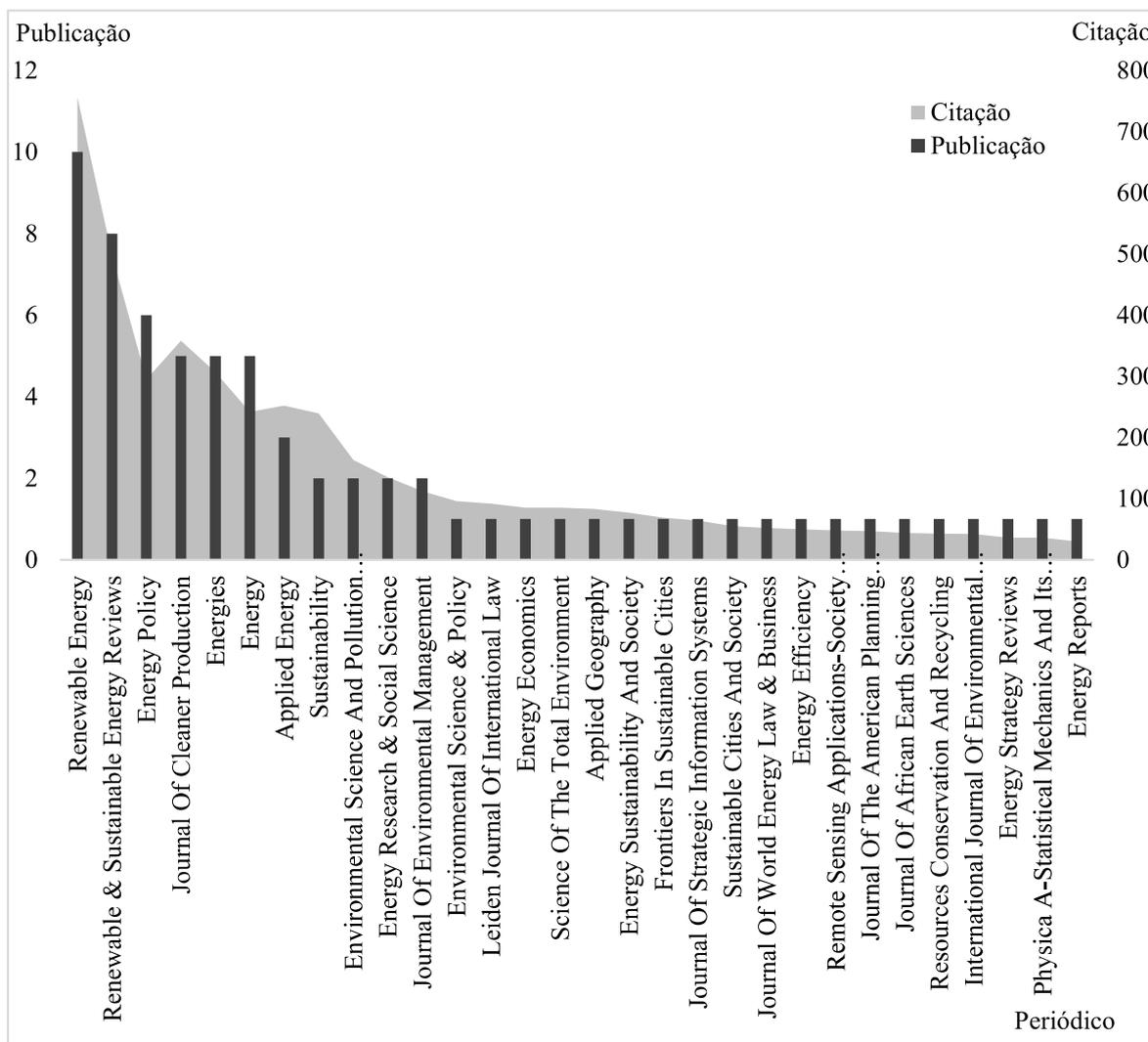
Na Figura 2.5 apresenta classificação do impacto dos periódicos das publicações de energias renováveis sob a perspectiva das políticas energéticas, economia circular e análise espacial, anual e acumulado, de 2008 a 2022. A *Renewable Energy* teve 10 publicações e 756 citações, sendo Gulagi et al. (2020) e Neupane et al. (2022) os mais citados, com 126 e 101 citações, respectivamente, evidenciando sua influência neste setor da pesquisa.

A *Renewable & Sustainable Energy Reviews* ficou em o segundo lugar com 8 publicadas e 498 citações, entre elas Hu et al. (2022), com 104 citações, avaliando os objetivos e estratégias da política energética na Nigéria, voltado para energia solar. Em terceira posição, a *Energy Policy* com 6 publicações e 295 citações, sendo Bradshaw e Jannuzzi (2019) o mais citado (78 citações), que examinou o desenvolvimento e implantação de tecnologias de energia eólica e solar em três governos estaduais no Brasil.

Os 7 periódicos com mais de 3 publicações, focaram na análise de políticas energéticas associado às energias renováveis, que somaram 42 publicações e 2.708 citações. *Journal of Cleaner Production*, *Energies* e *Energy* contaram 5 artigos, cada, e 358, 307 e 242 citações, respectivamente. *Applied Energy* teve 3 publicações da amostra, com 252

citações. Quatro periódicos apresentados tiveram 2 publicações e 19 apresentaram apenas uma publicação.

Figura 2.5. Classificação do impacto dos periódicos das publicações de energias renováveis sob a perspectiva das políticas energéticas, economia circular e análise espacial, de 2008 a 2022.

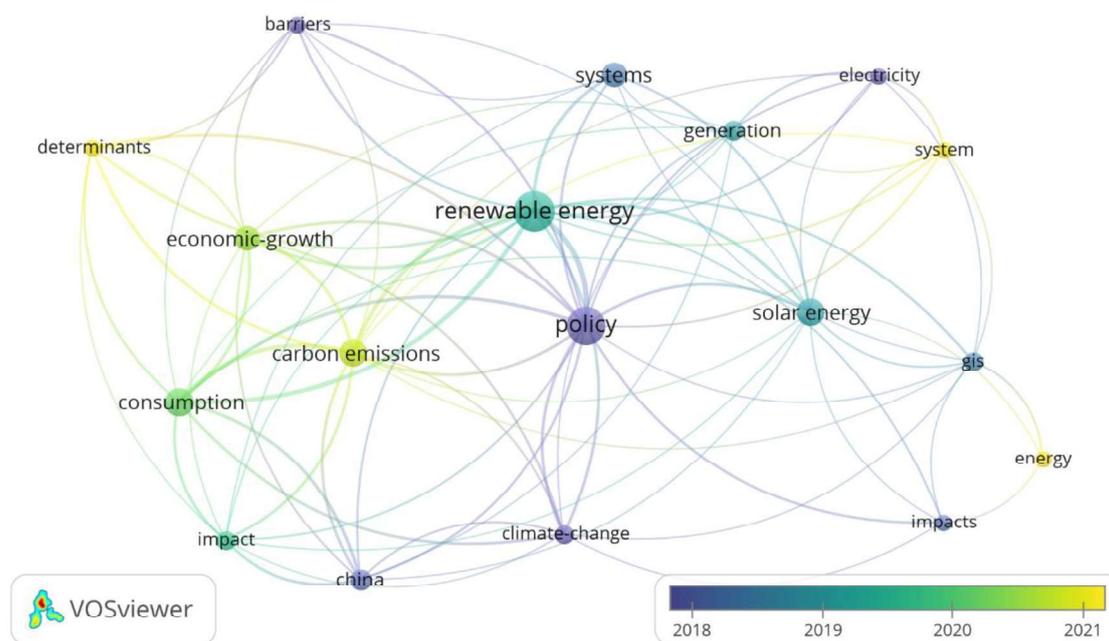


Fonte: Os autores (2024).

A Figura 2.6 exibe o mapa de co-ocorrência de palavras-chave dos autores presentes em pelo menos cinco publicações da amostra analisada, com *clusters* de evolução anual. A palavra “*renewable energy*” esteve mais presente na amostra, com o tema predominante nos trabalhos analisados. O nó que referiu a energia solar apresentou cor semelhante ao nó da energia renovável, mostrando que os trabalhos com esta abordagem são contemporâneos. O

segundo maior nó teve referência às análises de políticas públicas que estiveram presentes em aproximadamente 90% dos trabalhos da amostra. Os nós referentes ao consumo, emissão de carbono e crescimento econômico foram análises recentes que associou ao aumento de estudos que consideraram a união destes três termos aplicados a análise de energia renovável.

Figura 2.6. Evolução global da rede de palavras-chave associadas às energias renováveis sob perspectiva das políticas energéticas, economia circular e análise espacial, no período de 2018 a 2020.



Fonte: Os autores (2024).

2.3.2 Energias renováveis sob a ótica das políticas públicas

Na tabela 2.2 mostra a classificação sistemática dos artigos quanto às etapas do ciclo da política pública e o tipo de fonte renovável. A análise prévia foi identificada em 4 trabalhos em que considerou as estratégias essenciais para a instalação de políticas energéticas, além da apresentação esclarecedora para a futura formulação de políticas públicas. Dos estudos que abordaram a primeira etapa dos ciclos das políticas públicas, Aldhshan et al. (2021), destacaram a relevância de questões globais relacionadas ao consumo de energia, políticas públicas e indicadores para a eficiência energética. Essas considerações foram identificadas como fundamentais para planejamentos eficientes. Os autores

recomendaram que os responsáveis pela formulação de políticas energéticas buscassem orientações de especialistas ambientais, visando atingir a sustentabilidade tanto em escala global quanto no contexto local.

Tabela 2.2. Classificação sistemática dos artigos quanto às etapas do ciclo da política pública e o tipo de fonte renovável.

Descrição	Tipo de fonte	Autores
Análise prévia	Fontes renováveis	Aldhshan et al. (2021); Dong et al. (2016);Kiviranta et al. (2020);
	Solar	Guan et al. (2017);
Prospecção	Fontes renováveis	Agbaitoro; Oyibo (2022); AL-Barakani et al. (2022); Bigerna et al. (2021)(2022); He et al. (2022); Hu et al. (2022); Lesser; Su (2008); Li et al. (2022a); Li et al. (2022); Lian et al. (2022); Lv et al. (2022); Musial et al. (2021); Olnier et al. (2020); Sahoo et al. (2022); Scaramuzzino et al. (2019); Xu et al. (2022); Yu et al. (2021); Yu et al. (2021); Zheng et al. (2021).
	Solar	Islam et al. (2019); Jaegersberg; Ure (2011); Li et al. (2022b); Lin et al. (2022); Mohamed (2020); Njoh et al. (2019); Schunder et al. (2020); Yi et al. (2019); Zahran et al. (2008).
	Fontes renováveis sem solar	Bai et al.(2022) ; Boffardi et al. ; Cui et al. (2022).
	Solar e eólica	Neupane et al. (2022)
Avaliação	Fontes renováveis	Bridge et al. (2013); Duraskovic et al. (2021); Erdiwansyah et al. (2019); Fang; Zhou (2022); Gulagi et al. (2020); Karatayev et al. (2016); Lazaro et al. (2022); Schell et al. (2015); Shahnazi; Shabani (2020); Sharma; Banerjee (2021); Wang et al. (2019); Peidong et al. (2009); Zhuang; Pan (2022).
	Solar	Di Bari (2020); Eslami et al. (2021); Goodstein; Lovins (2019); Griffiths; Mills (2016); Holuj et al. (2021); Jain et al. (2020); Lan et al. (2020); Nordholm; Sareen (2021); Ozoegwu; Akpan (2021); Wang et al. (2022).
	Solar e eólica	Bistline et al. (2019); Killinger et al. (2015).

Fonte: Os autores (2024).

Considerando a disparidade regional, Dong et al. (2016) conduziram um estudo empírico focado na distribuição espaciais das energias renováveis na China. Ao identificar os principais conglomerados na indústria de energias renováveis, enfatizaram a relevância desses resultados na elaboração de políticas apropriadas pelas autoridades chinesas. Essas

ações eficazes foram implementadas com o intuito de estimular o desenvolvimento da indústria renovável.

Já Kiviranta et al. (2020) discutiram as políticas públicas em junção com as reduções dos custos em energia renovável que se direcionaram para transição energética com foco em fontes renováveis. Guan et al. (2017) investigaram as características regionais da China, abrangendo aspectos econômicos, capacidade de produção e políticas públicas. Além disso, examinaram as preocupações específicas relacionadas à energia solar e como essas preocupações impactaram o crescimento desigual dessa tecnologia nas províncias chinesas. Os autores dos dois estudos coincidiram na perspectiva de considerar as políticas públicas como um elemento crucial para fundamentar e sustentar a discussão central do trabalho, utilizando-as como argumento principal. Já os trabalhos com a segunda etapa do ciclo das políticas públicas totalizaram a maior parcela dos trabalhos com 32 artigos que representaram 46 % da amostra. Dos 32 trabalhos, 19 discutiram sobre as energias renováveis, considerando as fontes solar, eólica, biomassa e biogás, 9 consideraram apenas a energia solar, 3 levaram em conta as fontes renováveis sem citar diretamente a energia solar e 1 tratou da junção da energia solar e eólica.

Nesta etapa, grande parte dos autores analisaram as tendências globais, baseando na discussão central do trabalho, além de enumerar os fatores que afetaram a distribuição de energia renovável como um todo. O ponto em comum dos trabalhos inseridos na prospecção foi identificar as tendências, analisar o problema e apresentar possíveis soluções. Sendo assim, na amostra estudada, os autores fizeram recomendações para a formulação das políticas públicas embasando-se na discussão central do trabalho. Como Bigerna et al. (2021) que ofereceram evidências sobre o processo de convergência das fontes de energias renováveis em 176 países no período de 1990 a 2018. Os autores incorporaram diversas variáveis socioeconômicas e políticas, como abertura do comércio, nível de educação e distribuição de rendimentos. Eles destacaram a urgente necessidade de as empresas intensificarem os investimentos para alcançar emissões líquidas zero, globalmente. Isso se deve à implementação da nova política de descarbonização, que exigiram um aumento substancial, estimado em cerca de cinco vezes, nos investimentos em Fontes de Energia Renovável nas próximas três décadas, conforme preconizado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2020).

A terceira etapa do ciclo de políticas públicas teve como objetivo principal a avaliação. Na amostra analisada, 25 trabalhos avaliaram os impactos das políticas públicas

de energias renováveis para o desenvolvimento energético sustentável ou mitigação de problemas ambientais. Destes trabalhos, 12 deles abordaram de modo geral, considerando mais de três fontes renováveis, como Bridge et al. (2013) que avaliaram a política do governo do Reino Unido para transição de baixo carbono, considerando localização, paisagem, territorialidade, diferenciação espacial, dimensionamento e imersão espacial. Apenas a energia solar, foi trazida em 10 trabalhos, Di Bari (2020) trouxe a avaliação da análise de sensibilidade que mostrou como a tecnologia tornava-se mais atrativa com as políticas de incentivos governamentais.

A junção das fontes eólica e solar foram consideradas em dois trabalhos: Bistline et al. (2019) e Killinger et al. (2015). O primeiro artigo empregou um modelo integrado de investimentos e operações no setor elétrico, caracterizado por resoluções espaciais e temporais detalhadas. O objetivo foi examinar as respostas do mercado elétrico diante das disposições de flexibilidade presentes em mandatos prospectivos de energias renováveis. Os pesquisadores chegaram à conclusão de que o comércio, tanto de eletricidade quanto de instrumentos de conformidade ambiental, desempenha um papel significativo no planejamento e cumprimento de políticas. Eles ressaltaram que as interações espaciais entre sistemas de energia e políticas são cruciais para compreender as decisões de planejamento, custos futuros e dinâmicas dos mercados de energia renovável. Já Killinger et al. (2015), abordaram o potencial das fontes eólica e solar que expandiram rapidamente em decorrência das fortes políticas de apoio. Os autores avaliaram a otimização das fontes na Alemanha em três objetivos que formam o triângulo da política energética alemã: eficiência econômica, sustentabilidade ambiental e segurança de abastecimento. Concluiu-se que a eficiência econômica teve dependência de sistemas fotovoltaicos voltados para o Sul e uma alta proporção de turbinas eólicas são mais eficientes. Para uma sustentabilidade ambiental mais elevada, foi necessária uma alta proporção de sistemas fotovoltaicos, especialmente virados para oeste. E para segurança no abastecimento foi preciso uma ampla carteira de produção de energias renováveis é necessária.

A Tabela 2.3 apresenta uma classificação sistemática dos artigos quanto aos tipos de política. Dos 61 trabalhos da amostra, 21 tiveram abordagem de política distributiva, 18 trabalhos de política regulatória e 22 trabalhos de política redistributiva. As políticas distributivas abordaram amplamente as fontes renováveis em 9 trabalhos e os autores basearam-se em tornar viável a utilização de subsídios. Como Cui et al. (2022) que acreditavam que para energia renovável tivesse vantagem comparativa e expandisse as

reservas, era preciso fornecer subsídios e políticas ativas para o desenvolvimento deste tipo de tecnologia.

Tabela 2.3. Classificação sistemática dos artigos quanto aos tipos de política pública.

	Tipo de fonte	Autores
Política Distributiva	Fontes renováveis	Agbaitoro; Oyibo (2022); Bradshaw; Jannuzzi (2019); Dong et al. (2016); Duraskovic et al. (2021); Fang; Zhou (2022); Lesser; Su (2008); Li et al. (2022); Schell et al. (2015); Shahnazi; Shabani (2020).
	Solar	Di Bari (2020); Griffiths; Mills (2016); Holuj et al. (2021); Lan et al. (2020); Li et al. (2022); Yi et al. (2019); Zahran et al. (2008).
	Fontes renováveis sem solar	Cui et al. (2022)
	Solar e eólica	Neupane et al. (2022)
Política Redistributiva	Fontes renováveis	AL-Barakani et al. (2022); Bigerna et al. (2021); Erdiwansyah et al. (2019); Gulagi et al. (2020); Kiviranta et al. (2020); Lian et al. (2022); Musial et al. (2021); Scaramuzzino et al. (2019); Sharma; Banerjee (2021); Yu et al. (2021); Zhuang; Pan (2022).
	Solar	Eslami et al. (2021); Guan et al. (2017); Islam et al. (2019); Jaegersberg; Ure (2011); Njoh et al. (2019); Nordholm; Sareen (2021); Ozoegwu; Akpan (2021); Schunder et al. (2020).
	Fontes renováveis sem solar Solar e eólica	Bai et al. (2022) Killinger et al. (2015)
Política Regulatória	Fontes renováveis	Aldhshan et al. (2021); Bridge et al. (2013); He et al. (2022); Hu et al. (2022); Karatayev et al. (2016); Lazaro et al. (2022); Li et al. (2022); Lv et al. (2022); Olnier et al. (2020); Sahoo et al. (2022); Wang et al. (2019); Xu et al. (2022); Yu et al. (2021); Peidong et al. (2009); Zheng et al. (2021).
	Solar	Goodstein; Lovins (2019); Jain et al. (2020); Lin et al. (2022); Mohamed (2020); Wang et al. (2022).
	Fontes renováveis sem solar Solar e eólica	Boffardi et al. (2021) Bistline et al. (2019)

Fonte: Os autores (2024).

Apenas a fonte solar foi trazida em 7 trabalhos, como Holuj et al. (2021) que analisaram o potencial de geração de energia fotovoltaica de edifícios inseridos no fenômeno de expansão urbana. As discussões do trabalho mostraram as condições atuais do setor energético e o estado das políticas energéticas na Polônia e União Europeia, também foram propostas recomendações para as políticas espaciais locais relativas à mitigação dos efeitos da suburbanização no desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos. A energia solar associada

à energia eólica foi trazida apenas por Neupane et al. (2022) que levaram em conta os subsídios como umas das variáveis principais da discussão, mostrando seu quadro evolutivo e relevância para a avaliação do potencial energético em nível provincial no Nepal. As conclusões são úteis para a formulação de políticas específicas de recursos do país, a nível subnacional.

Para as políticas redistributiva, os autores examinaram, em 11 trabalhos, o tema das energias renováveis de maneira abrangente. Um exemplo significativo é o estudo de Musial et al. (2021), que detalhou os padrões e tendências das políticas energéticas para fontes renováveis nos países membros da União Europeia. Este estudo enfatizou a importância de extrair lições valiosas dos líderes no campo de energias renováveis. A análise destacou a necessidade de superar desafios, aproveitar oportunidades e desenvolver políticas públicas eficazes para distribuição dos recursos energéticos. O objetivo final foi facilitar uma transição bem-sucedida para um cenário mais sustentável em toda a União Europeia.

A energia solar foi a variável renovável em 8 trabalhos que trataram as políticas redistributivas. Como por exemplo Jaegersberg e Ure (2011) que discutiram as barreiras presentes no setor solar e trouxeram as políticas públicas regionais e nacionais que geram valores regionais, aqueceram a economia através da geração de empregos e com oportunidades para empresas de pequeno porte. Schunder et al. (2020) analisaram especialmente o potencial da energia solar comunitária e acessível, com isso mostraram que a população de baixa renda e minoritária teve acesso baixo à energia solar nos telhados. Os resultados encontrados mostraram a necessidade de elaborar políticas para abordar questões de acesso, para que toda população pudesse ser beneficiada em diferentes comunidades. Os dois trabalhos concluíram que as políticas públicas que focaram nessa abordagem precisam ser desenvolvidas para atingir maior número de comunidades diferentes.

A junção da energia solar com a eólica foi considerada em apenas um trabalho, Killinger et al. (2015). Bai et al. (2022) examinaram várias fontes renováveis, excluindo a solar, para analisar os efeitos espaciais das energias renováveis nas emissões de carbono em regiões menos desenvolvidas da China. Eles apresentaram evidências empíricas que podem auxiliar os formuladores de políticas governamentais a alcançar as metas de redução de emissões de carbono.

As políticas regulatórias tiveram 15 trabalhos que consideraram mais de três fontes renováveis em sua discussão, como Olnier et al. (2020) que trouxeram um modelo que estabelece a política de transição de carbono, com o objetivo de ir além da identificação dos

setores mais afetados, mas também considerar intervenções direcionadas a promover conexões intermediárias de baixo carbono. Apenas a energia solar foi trazida em 5 trabalhos, como Wang et al. (2022) que fizeram uma avaliação espaço-temporal dos desafios dos resíduos fotovoltaicos, considerando os princípios de circularidade e mostrando a necessidade da legislação para monitorar a gestão sustentável dos painéis fotovoltaicos.

A junção da energia solar com a eólica foi discutida por Bistline et al. (2019) que examinaram as respostas do mercado de eletricidade às fontes renováveis. Boffardi et al. (2021) discutiram sem considerar a energia solar, especificamente, com uma abordagem em duas etapas para avaliar os impulsionadores e as barreiras às políticas de energia renovável na Itália e mostraram que os impulsionadores da região tiveram um papel relevante na transição energética. Ambos os estudos reconheceram a importância do comércio no planejamento e cumprimento de políticas públicas e ressaltaram a relevância das interações espaciais entre sistemas de energia e políticas para compreender as decisões de planejamento, custos futuros e dinâmicas dos mercados de energia renovável.

2.3.3 Energias renováveis sob a ótica da economia circular

Os autores da amostra analisada começaram a estudar as energias renováveis sob a ótica do modelo econômico circular apenas na década de 2020, refletindo o quanto o tema foi recente. Esta abordagem mostrou-se necessária pelo aumento da adoção de energias renováveis, aumentando a conscientização ambiental associada à produção, utilização e descarte de tecnologias renováveis. A academia começou a buscar compreender e mitigar os impactos do descarte das fontes renováveis, promovendo a economia circular.

A Tabela 2.4 mostra a classificação dos tipos de economia circular abordados na amostra. Bigerna et al. (2021) analisaram a difusão das energias renováveis no mundo e argumentaram que este setor deveria ser impulsionado pela filosofia da economia circular, por sua importância na Europa, tratando a economia circular como variável auxiliar para sua discussão. Li et al. (2022) e Kiviranta et al. (2020) trouxeram a abordagem de *design* regenerativo com a perspectiva do *Cradle to Cradle* que mostrou que os recursos são cíclicos e podem ser reutilizados. O primeiro trabalho discutiu esquemas de reciclagem para módulos fotovoltaicos, assim como políticas de reciclagem aplicadas a este tema, considerando o gerenciamento eficaz dos módulos. Os autores perceberam que, baseando no estado atual da tecnologia de reciclagem, as políticas irão impor custos adicionais que irão impactar, de forma negativa, o sistema fotovoltaico. Já Kiviranta et al. (2020) fizeram um estudo nas Ilhas

de Aland, pois a capacidade elétrica, a partir de fontes renováveis, deve-se elevar em um futuro próximo. Os autores consideraram que o tratamento dos resíduos, a partir de princípios circulares, poderiam aumentar o valor dos investimentos em energia renovável, além de gerenciar a saída de energia renovável variável. Então, concluíram, com o trabalho, que para estabelecer esta cultura circular seria necessária a cooperação de empresas e os picos de produção de energia renovável variável na economia circular superariam os benefícios econômicos anuais das exportações de energia.

Tabela 2.4. Classificação sistemática dos artigos quanto ao tipo de economia circular.

Tipo de Economia Circular	Autores
Variável auxiliar	Bigerna et al. (2021)
Desing regenerativo (<i>Cradle to Cradle</i>)	Kiviranta et al. (2020); Li et al. (2022).
Economia de performance (<i>double loop</i>)	Franz; Piringer (2020); Wang et al. (2022).

Fonte: Os autores (2024).

Franz e Piringer (2020) e Wang et al. (2022) buscaram novas alternativas para os resíduos e para reinseri-los na cadeia de produção com a Economia de Performance com a perspectiva do *Double loop*. Os autores do primeiro trabalho exploraram o desenvolvimento do mercado de energia fotovoltaica nos países da União Europeia e fizeram uma revisão de literatura com o tratamento de resíduos de módulos e a aplicação de reutilização destes módulos. Foi concluído que os custos de reciclagem e reutilização foram cobertos pelas taxas de produção e lucro da matéria-prima.

Já Wang et al (2022) analisaram a distribuição de resíduos fotovoltaicos na China, considerando critérios como escala de implantação, crescimento e distribuição. Este estudo tem a relevância de expandir o conhecimento sobre resíduos fotovoltaicos e fornecer a magnitude, tendências, locais e tipos de resíduos para gerir e estudar a reinserção no fluxo econômico, a partir da economia circular. Percebe-se que a economia circular aplicada às energias renováveis iniciou a sua exploração na década de 2020 e isto pôde-se associar à pandemia de COVID-19 que desenvolveu ideias sustentáveis (WAIGANJO et al., 2021). A cúpula do clima da ONU (COP25) em 2019 também pode ter refletido aumento, pois teve ênfase em metas ambiciosas para redução de emissões (MACARTHUR; HEADING, 2019).

2.3.4 Energias renováveis sob a ótica da análise espacial

O indicador I de Moran foi frequente, sendo um método eficaz para visualizar distribuições espaciais, identificar *outliers*, determinar padrões de associação espacial e propor regimes ou outras formas de heterogeneidade espacial (JESRI et al., 2021). O Sistema de Informações Geográficas (SIG) também desempenhou um papel proeminente como indicador na amostra. Tratando-se de procedimentos computacionais e recursos humanos, os SIGs facilitam a análise e representação geográfica, contribuindo significativamente para o entendimento espacial das energias renováveis (CATRO-SANTOS et al., 2020).

Ao considerar as variáveis espaciais de investimento e tecnologia, provavelmente que o consumo de energia renovável tenha dependência espacial (LV; LIU; XU, 2022). Esta análise espacial das fontes renováveis foi relevante para entender o impacto dos fenômenos e como se comportaram as variáveis com proximidade (SEVERIANO et al., 2021). Sendo assim, na amostra analisada aproximadamente 70% dos trabalhos consideraram a análise espacial em sua discussão, contabilizando 48 trabalhos, com início em 2008, como mostrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Classificação sistemática dos artigos para os indicadores espaciais.

Indicador	Autores
Mapa de calor	AL-Barakani et al. (2022); Bistline et al. (2019); Di Bari (2020); Eslami et al. (2021); Guan et al. (2017); Gulagi et al. (2020); Holuj et al. (2021); Jain et al. (2020); Killinger et al. (2015); Sharma; Banerjee (2021); Wang et al. (2022); Yu et al. (2021).
GIS	Aldhshan et al. (2021); Mohamed (2020); Neupane et al. (2022); Sahoo et al. (2022); Zahran et al. (2008).
I de Moran	Bai et al. (2022); Cui et al. (2022); He et al. (2022); Lan et al. (2020); Li et al. (2022); Lv et al. (2022); Scaramuzzino et al. (2019); Shahnazi; Shabani (2020); Wang et al. (2019); Xu et al. (2022); Zheng et al. (2021); Zhuang; Pan (2022).
AHP	Dong et al. (2016); Lian et al. (2022).
Gini	Fu et al. (2017); Li et al. (2022).
Outros indicadores	Bigerna et al. (2021); Boffardi et al. (2021); Bridge et al. (2013); Jaegersberg; Ure (2011); Li et al. (2022); Lin et al. (2022); Tang et al. (2020); Olnier et al. (2020); Yi et al. (2019); Yu et al. (2021)

Fonte: Os autores (2024).

Dentre os trabalhos que consideraram a análise espacial, 14 deles utilizaram mapa de calor para auxiliar na descrição de dados espaciais. AL-Barakani et al. (2022) fizeram uso deste artifício para realizar a análise espacial do efeito do desenvolvimento financeiro na pegada ecológica dos países e relacionaram as conclusões ao nível de implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relevantes. Os resultados do mapa de calor

proporcionaram aos decisores políticas novas perspectivas para melhorar o desempenho ambiental dos países analisados.

O indicador mais utilizado foi o I de Moran, em 12 trabalhos, como Scaramuzzino et al. (2019) que classificaram territórios de uma área específica da Europa de acordo com as semelhanças no potencial estimado de suas fontes renováveis e considerando a estrutura econômica, sociodemográfica e geográfica. Os resultados derivados do agrupamento das unidades territoriais e da análise de *clusters* foram concebidos com o propósito de servir como ferramenta para os decisores políticos europeus, oferecendo *insights* valiosos no desenvolvimento de políticas e estratégias transnacionais mais direcionadas no âmbito das energias renováveis. Já Cui et al. (2022) consideraram a autocorrelação espacial no crescimento da energia renovável, os resultados desta análise forneceram informações sobre como alcançar um desenvolvimento econômico sustentável e com equilíbrio.

O segundo indicador mais utilizado foi o Sistema de Informações Geográficas (GIS), presente em 8 trabalhos. Zahran et al. (2008) examinaram a distribuição geográfica de residências nos Estados Unidos que fizeram uso de energia solar fotovoltaica. Observaram que o número de residências adotando essa tecnologia apresentou um aumento significativo em regiões com maior incidência de radiação solar. Entretanto, destacaram que fatores ambientais, socioeconômicos e políticos também desempenham um papel relevante nesse cenário. Já Molnar et al (2022) utilizaram o GIS para estimar o potencial técnico global da produção de energia solar integrada em edifícios, fazendo estimativa das áreas utilizáveis de telhados e foi encontrado que 60% dos telhados são adequados para instalação.

Dong et al. (2016) e Lian et al. (2022) utilizaram o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para análise espacial. O primeiro trabalho analisou a distribuição espacial da indústria de energia renovável da China, em decorrência da vasta disparidade regional, baseando-se na análise do valor da produção industrial, quantidade e localização das empresas e bases industriais. O segundo trabalho avaliou o sistema de indicadores construído para o desenvolvimento abrangente das fontes renováveis, os resultados mostraram que o nível de desenvolvimento em cada província é baixo e as áreas de nível relativamente alto moveram-se para o leste.

O índice de Gini foi utilizado em dois trabalhos da amostra para realizar análise espacial de variáveis relacionadas às energias renováveis. Fu et al. (2017) examinaram as características geográficas de comércios de energia renovável com banco de dados das Nações Unidas de 1988 a 2013 e os resultados mostraram que as redes estão se expandindo

para incluir mais países e relacionamentos. Já Li et al. (2022) utilizaram o Gini para identificar as tendências e fatores que afetaram a distribuição de energia renovável e a disparidade entre os países.

Os indicadores menos comuns apareceram em apenas um trabalho, somaram 10 trabalhos e trouxeram diferentes abordagens espaciais com o objetivo de estudar o desenvolvimento espaço-temporal das variáveis envolvidas e auxiliar o desenvolvimento de políticas públicas no setor. Os autores trouxeram a análise de decomposição espacial (Yu et al., 2021), área de viagem para o trabalho (Olnier et al., 2020), cadeia espacial de Markov (Tang et al., 2020), identificação de cluster (Jaegersberg; Ure, 2011), análise envoltória de dados (Yi et al., 2019), descrição da localização e diferenciação espacial (Bridge et al., 2013), índice de distribuição (Schunder et al., 2020), polarização (Lin et al., 2022), sigma de convergência (Bigerna et al., 2021) e análise multidimensional (Boffardi et al., 2021).

2.4 CONCLUSÃO

Com base nas análises observou-se que os estudos que abordam políticas públicas, análises espaciais e economia circular no contexto de energias renováveis teve início em 2008. Esse marco temporal pôde ser atribuído à crise financeira global ocorrida neste ano, a qual afetou diversos setores e ressaltou a necessidade de reavaliar práticas econômicas em direção à sustentabilidade. Mostrou-se que o período de maior frequência para essa temática foi em 2019, quando identificou-se nove publicações importantes para a discussão. Este aumento é passível de ser associado à implementação da Agenda de Desenvolvimento Sustentável da ONU em 2015.

Os países que apresentaram a maior quantidade de publicações sobre o tema foram China, Estados Unidos, Reino Unido, Holanda, Índia e Itália. Estes países também ocuparam posições destacadas no *ranking* de emissões de gases do efeito estufa. Este enfoque estratégico foi crucial para enfrentar os desafios relacionados às mudanças climáticas e promover uma transição eficaz em direção a fontes de energia mais sustentáveis. Observou-se também que a aplicação da economia circular ao setor renovável começou a ser explorada apenas na década de 2020, em a cúpula do clima da ONU (COP25) em 2019 refletiu este aumento, pois teve metas ambiciosas para redução de emissões.

Foi observada uma lacuna significativa na quantidade de estudos que abordam as políticas públicas relacionadas à economia circular no contexto das energias renováveis. Essa lacuna ressaltou a necessidade de uma atenção mais direcionada e abrangente por parte

da comunidade acadêmica e das instituições de pesquisa para explorar e compreender as dinâmicas específicas que envolvem a economia circular no setor de energias renováveis.

Os resultados obtidos neste estudo desempenharam um papel inovador ao embasar pesquisas futuras, ampliando assim os limites do conhecimento. A abordagem inovadora que envolve a tríade associada às energias renováveis contribuiu para a compreensão aprofundada do tema e estabelece precedentes outros estudos. As limitações deste trabalho englobam a utilização de uma base de dados para os artigos e a definição das buscas pode ter levado a exclusão de artigos relevantes. No entanto, as limitações foram amenizadas com a escolha da maior base de dados acadêmicos do mundo, *Web of Science*, além da adaptação para melhor busca que englobe os artigos mais importantes até 2022.

2.5 REFERÊNCIAS

ABDO, A. B., BIN, L., ZHANG, X., SAEED, M., QAHTAN, A. S. A., & GHALLAB, H. M. H. Spatial analysis of financial development's effect on the ecological footprint of belt and road initiative countries: Mitigation options through renewable energy consumption and institutional quality. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132696, 2022.

AGBAITORO, G. A.; OYIBO, K. I. Realizing the United Nations Sustainable Development Goals 7 and 13 in sub-Saharan Africa by 2030: synergizing energy and climate justice perspectives. **The Journal of World Energy Law & Business**, v. 15, n. 3, p. 223–235, 2022.

ABDO, A. B., BIN, L., ZHANG, X., SAEED, M., QAHTAN, A. S. A., & GHALLAB, H. M. H. Spatial analysis of financial development's effect on the ecological footprint of belt and road initiative countries: Mitigation options through renewable energy consumption and institutional quality. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132696, 2022.

ALDHSAN, S. R., ABDUL MAULUD, K. N., WAN MOHD JAAFAR, W. S., KARIM, O. A., & PRADHAN, B. Energy Consumption and Spatial Assessment of Renewable Energy Penetration and Building Energy Efficiency in Malaysia: A Review. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9244, 2021.

BAI, J., LI, S., KANG, Q., WANG, N., GUO, K., WANG, J., & CHENG, J. Spatial Spillover Effects of Renewable Energy on Carbon Emissions in Less-developed Areas of China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 13, p. 19019–19032, 2022.

BALTA-OZKAN, N.; YILDIRIM, J.; CONNOR, P. M. Regional distribution of photovoltaic deployment in the UK and its determinants: A spatial econometric approach. **Energy Economics**, v. 51, p. 417–429, 2015.

BIGERNA, S.; BOLLINO, C. A.; POLINORI, P. Convergence in renewable energy sources diffusion worldwide. **Journal of Environmental Management**, v. 292, p. 112784, 2021.

BISTLINE, J; SANTEN, N; YOUNG, D. The economic geography of variable renewable energy and impacts of trade formulations for renewable mandates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 106, p. 79-96, 2019.

BOEING, G., HIGGS, C., LIU, S., GILES-CORTI, B., SALLIS, JF, CERIN, E., ARUNDEL, J. Utilizar dados abertos e software de código aberto para desenvolver indicadores espaciais de desenho urbano e características de transporte para alcançar cidades saudáveis e sustentáveis. **The Lancet Global Health**, v. 6, pág. e907-e918, 2022.

BRADSHAW, A; MARTINO JANNUZZI, G. Governing energy transitions and regional economic development: Evidence from three Brazilian states. **Energy Policy**, v. 126, p. 1-11, 2019.

BRIDGE, G., BOUZAROVSKI, S., BRADSHAW, M., & EYRE, N.. Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy. **Energy Policy**, v. 53, p. 331-340, 2013.

BROCK, A; SOVACOO, B.K.; HOOK, A. Volatile photovoltaics: green industrialization, sacrifice zones, and the political ecology of solar energy in Germany. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 111, n. 6, p. 1756-1778, 2021.

BOFFARDI, R; IOPPOLO, G; ARBOLINO, R. A two-step approach to evaluate drivers and barriers to clean energy policies: Italian regional evidence. **Environmental Science & Policy**, v. 120, p. 173-186, 2021.

BORYSIK, O; BRYCH, V. Post-COVID-19 Revitalisation and Prospects for Climate Neutral Energy Security Technologies. **Problemy Ekorożwoju**, v. 17, n. 2, 2022.

CAMACHO-OTERO, J., BOKS, C., & PETERSEN, I. N. Consumption in the circular economy: A literature review. **Sustainability**, v. 10, n. 8, p. 2758, 2018.

CALVERT, K; MABEE, W. More solar farms or more bioenergy crops? Mapping and assessing potential land-use conflicts among renewable energy technologies in eastern Ontario, Canada. **Applied Geography**, v. 56, p. 209-221, 2015.

CASTRO-SANTOS, L., LAMAS-GALDO, MI, & FILGUEIRA-VIZOSO, A. Managing the oceans: Site selection of a floating offshore wind farm based on GIS spatial analysis. **Marine Policy**, v. 113, p. 103803, 2020.

CAVALCANTE, W. Q. D. F., COELHO, A., & BAIRRADA, C. M. Sustainability and tourism marketing: A bibliometric analysis of publications between 1997 and 2020 using vosviewer software. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4987, 2021.

CHEN, I. C., & YANG, B. C. Developing decision model and sustainable mapping to screen the efficiency of brownfield redevelopment based on socioeconomic open data. **Sustainable Environment Research**, v. 32, n. 1, p. 1-19, 2022.

CIFUENTES-FAURA, J. European Union policies and their role in combating climate change over the years. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 15, n. 8, p. 1333-1340, 2022.

CLIMATE WATCH. **Historical Emissions Explorer**. Disponível em: <<https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=All%20Selected&historical-emissions-sectors=total-including-lucf%2Ctotal-including-lucf&page=1>>. Acesso em: <11 de janeiro de 2024>.

CORTÉS-BORDA, D; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G; JIMÉNEZ, L. Solar energy embodied in international trade of goods and services: a multi-regional input-output approach. **Energy**, v. 82, p. 578-588, 2015.

DANESE, M; GIOIA, D. Spatial Analysis for Landscape Changes: A Bibliometric Review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, p. 10078, 2021.

DAS, P. K., BHAT, M. Y., & SAJITH, S. Life cycle assessment of electric vehicles: a systematic review of literature. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-17, 2023.

DE PASCALE, A., ARBOLINO, R., SZOPIK-DEPCZYŃSKA, K., LIMOSANI, M., & IOPPOLO, G. A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 124942, 2021.

DI BARI, A. A real options approach to valuate solar energy investment with public authority incentives: The Italian case. **Energies**, v. 13, n. 16, p. 4181, 2020.

DONG, L., LIANG, H., GAO, Z., LUO, X., & REN, J Spatial distribution of China's renewable energy industry: Regional features and implications for a harmonious development future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1521–1531, 1 maio 2016.

DOILE, G. N. D., ROTELLA JUNIOR, P., ROCHA, L. C. S., BOLIS, I., JANDA, K., & COELHO JUNIOR, L. M. Hybrid wind and solar photovoltaic generation with energy storage systems: A systematic literature review and contributions to technical and economic regulations. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6521, 2021.

DONTHU, N., KUMAR, S., MUKHERJEE, D., PANDEY, N., & LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021.

ĐURAŠKOVIĆ, J; KONATAR, M; RADOVIĆ, M. Renewable energy in the Western Balkans: Policies, developments and perspectives. **Energy Reports**, v. 7, p. 481-490, 2021.

ERSKINE, M. A., KHOJAH, M., & MCDANIEL, A. E Location selection using heat maps: Relative advantage, task-technology fit, and decision-making performance. **Computers in Human Behavior**, v. 101, p. 151-162, 2019.

ESLAMI, H., NAJEM, S., ABI GHANEM, D., & AHMAD, A. The potential of urban distributed solar energy in transition economies: The case of Beirut city. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112121, 2021.

FANG, M. M.; ZHOU, W. Greening the road: China's low-carbon energy transition and international trade regulation. *Leiden Journal of International Law*, v. 35, n. 2, p. 357-378, 2022.

FRANCH-PARDO, I., NAPOLETANO, B. M., ROSETE-VERGES, F., & BILLA, L. Spatial analysis and GIS in the study of COVID-19. A review. **Science of the total environment**, v. 739, p. 140033, 2020.

FRANCO, M. A.; GROESSER, S. N. A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9615, jan. 2021.

FRANZ, M; PIRINGER, G. Market development and consequences on end-of-life management of photovoltaic implementation in Europe. *Energy, Sustainability and Society*, v. 10, p. 1-21, 2020.

- FU, X., YANG, Y., DONG, W., WANG, C., & LIU, Y.. Spatial structure, inequality and trading community of renewable energy networks: A comparative study of solar and hydro energy product trades. **Energy Policy**, v. 106, p. 22-31, 2017.
- GATTO, A; MATTERA, R; PANARELLO, D. For whom the bell tolls. A spatial analysis of the renewable energy transition determinants in Europe in light of the Russia-Ukraine war. **Journal of Environmental Management**, v. 352, p. 119833, 2024.
- GRANADOS, J.A.T; SPASH, C. L. Policies to reduce CO2 emissions: Fallacies and evidence from the United States and California. **Environmental Science & Policy**, v. 94, p. 262-266, 2019.
- GRIFFITHS, S; MILLS, R. Potential of rooftop solar photovoltaics in the energy system evolution of the United Arab Emirates. **Energy Strategy Reviews**, v. 9, p. 1-7, 2016.
- GOODSTEIN, E; LOVINS, L. H. A pathway to rapid global solar energy deployment? Exploring the solar dominance hypothesis. **Energy Research & Social Science**, v. 56, p. 101197, 2019.
- GUAN, Q., AN, H., LI, H., & HAO, X.. The rapid bi-level exploration on the evolution of regional solar energy development. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 465, p. 49–61, 1 jan. 2017.
- GULAGI, A., RAM, M., SOLOMON, A. A., KHAN, M., & BREYER, C. Current energy policies and possible transition scenarios adopting renewable energy: A case study for Bangladesh. **Renewable Energy**, v. 155, p. 899-920, 2020.
- GUPTA, M., SHARMA, A., SHARMA, D. K., NIROLA, M., DHUNGEL, P., PATEL, A., & GUPTA, A.. Tracing the COVID-19 spread pattern in India through a GIS-based spatio-temporal analysis of interconnected clusters. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 847, 2024.
- HALAMA, A; MAJOREK, A. Photovoltaic microgeneration (RES) in selected major cities in Silesian Voivodeship. **Economics and Environment**, v. 80, n. 1, p. 109-124, 2022.
- HE, Z., KUAI, L., CHEN, X., SHEN, W., & LI, W.. Exploring the spatial pattern of renewable energy technology innovation: evidence from China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 39, p. 59076–59093, 1 ago. 2022.
- HE, J., YANG, Y., LIAO, Z., XU, A., & FANG, K.. Linking SDG 7 to assess the renewable energy footprint of nations by 2030. **Applied Energy**, v. 317, p. 119167, 2022.
- HERRERA-FRANCO, G., MONTALVAN-BURBANO, N., CARRION-MERO, P., JAYA-MONTALVO, M., & GURUMENDI-NORIEGA, M. Worldwide research on geoparks through bibliometric analysis. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1175, 2021.
- HÖFER, T; MADLENER, R. Locational (In) Efficiency of renewable energy feed-in into the electricity grid: A spatial regression analysis. **The Energy Journal**, v. 42, n. 1, 2021.
- HOLUJ, A., ILBA, M., LITYŃSKI, P., MAJEWSKI, K., SEMCZUK, M., & SERAFIN, P. Photovoltaic Solar Energy from Urban Sprawl: Potential for Poland. **Energies**, v. 14, n. 24, p. 8576, 2021.
- HORNBORG, A; CEDERLÖF, G; ROOS, A. Has Cuba exposed the myth of “free” solar power? Energy, space, and justice. *Environment and planning E: Nature and space*, v. 2, n. 4, p. 989-1008, 2019.

HU, K., SINHA, A., TAN, Z., SHAH, M. I., & ABBAS, S. Achieving energy transition in OECD economies: Discovering the moderating roles of environmental governance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, p. 112808, 1 out. 2022.

IOANNIDIS, F.; KOSMIDOU, K.; PAPANASTASIOU, D. Public awareness of renewable energy sources and Circular Economy in Greece. **Renewable Energy**, v. 206, p. 1086–1096, 1 abr. 2023.

IONESCU, R. V., ZLATI, M. L., ANTOHI, V. M., SUSANU, I. O., & CRISTACHE, N. A new approach on renewable energy as a support for regional economic development among the European Union. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 184, p. 121998, 1 nov. 2022.

ISLAM, M. T.; HUDA, N.; SAIDUR, R. Current energy mix and techno-economic analysis of concentrating solar power (CSP) technologies in Malaysia. **Renewable Energy**, v. 140, p. 789–806, 1 set. 2019.

JAEGERSBERG, G.; URE, J. Barriers to knowledge sharing and stakeholder alignment in solar energy clusters: Learning from other sectors and regions. **The Journal of Strategic Information Systems**, v. 20, n. 4, p. 343–354, 1 dez. 2011.

JAIN, A., DAS, P., YAMUJALA, S., BHAKAR, R., & MATHUR, J. Resource potential and variability assessment of solar and wind energy in India. **Energy**, v. 211, p. 118993, 2020.

JANKOWSKA, B.; STALIŃSKI, A.; TRĄPCZYŃSKI, P. Public policy support and the competitiveness of the renewable energy sector – The case of Poland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111235, 1 out. 2021.

JENNICHES, S; WORRELL, E. Regional economic and environmental impacts of renewable energy developments: Solar PV in the Aachen Region. **Energy for Sustainable Development**, v. 48, p. 11-24, 2019.

JESRI, N., SAGHAFIPOUR, A., KOOHPAEI, A., FARZINNIA, B., JOOSHIN, M. K., ABOLKHEIRIAN, S., & SARVI, M. Mapping and spatial pattern analysis of COVID-19 in Central Iran using the Local Indicators of Spatial Association (LISA). **Public Health**, v. 21, p. 1-10, 2021.

KARATAYEV, M., HALL, S., KALYUZHNOVA, Y., & CLARKE, M. L.. Renewable energy technology uptake in Kazakhstan: Policy drivers and barriers in a transitional economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 120-136, 2016.

KILLINGER, S., MAINZER, K., MCKENNA, R., KREIFELS, N., & FICHTNER, W.. A regional optimisation of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives. **Energy**, v. 84, p. 563-574, 2015.

KIVIRANTA, K., THOMASSON, T., HIRVONEN, J., & TÄHTINEN, M.. Connecting circular economy and energy industry: A techno-economic study for the Åland Islands. **Applied Energy**, v. 279, p. 115883, 1 dez. 2020.

KUZIOR, A; SIRA, M. A bibliometric analysis of blockchain technology research using VOSviewer. **Sustainability**, v. 14, n. 13, p. 8206, 2022.

LAN, H., CHENG, B., GOU, Z., & YU, R.. An evaluation of feed-in tariffs for promoting household solar energy adoption in Southeast Queensland, Australia. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101942, 2020.

- LAZARO, L. L. B., SOARES, R. S., BERMANN, C., COLLAÇO, F. M. D. A., GIATTI, L. L., & ABRAM, S.. Energy transition in Brazil: Is there a role for multilevel governance in a centralized energy regime?. **Energy Research & Social Science**, v. 85, p. 102404, 2022.
- LEE, C.-C.; WANG, F.; CHANG, Y.-F. Does green finance promote renewable energy? Evidence from China. **Resources Policy**, v. 82, p. 103439, 1 maio 2023.
- LESSER, J. A.; SU, X. Design of an economically efficient feed-in tariff structure for renewable energy development. **Energy Policy**, v. 36, n. 3, p. 981–990, 1 mar. 2008.
- LI, C., LIN, T., CHEN, Y., YAN, Y., & XU, Z. Nonlinear impacts of renewable energy consumption on economic growth and environmental pollution across China. **Journal of Cleaner Production**, v. 368, p. 133183, 25 set. 2022a.
- LIU, Junxia. China's renewable energy law and policy: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 99, p. 212-219, 2019.
- YAN, L. I., ZHANG, Q., GE, W. A. N. G., & XI, L. U. Recycling schemes and supporting policies modeling for photovoltaic modules considering heterogeneous risks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106165, 1 maio 2022b.
- LI, Z.; LUAN, R.; LIN, B. The trend and factors affecting renewable energy distribution and disparity across countries. **Energy**, v. 254, p. 124265, 1 set. 2022.
- LIAN, W., WANG, B., GAO, T., SUN, X., ZHANG, Y., & DUAN, H.. Coordinated Development of Renewable Energy: Empirical Evidence from China. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11122, jan. 2022.
- LIN, B.; HUANG, C. Promoting variable renewable energy integration: The moderating effect of digitalization. **Applied Energy**, v. 337, p. 120891, 1 maio 2023.
- LIN, X.; TANG, Z.; LONG, H. Spatial and temporal research on ecological total factor energy efficiency in China: Based on “Ecology-Economy-Geography” heterogeneity framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, p. 134143, 1 dez. 2022.
- LUTZ, Sebastian Uljas. The European digital single market strategy: Local indicators of spatial association 2011–2016. **Telecommunications Policy**, v. 43, n. 5, p. 393-410, 2019.
- LV, Z.; LIU, W.; XU, T. Evaluating the impact of information and communication technology on renewable energy consumption: A spatial econometric approach. **Renewable Energy**, v. 189, p. 1–12, 1 abr. 2022.
- MACARTHUR, E; HEADING, H. How the circular economy tackles climate change. **Ellen MacArthur Found**, v. 1, p. 1-71, 2019.
- MAGNANI, N; VAONA, A. Regional spillover effects of renewable energy generation in Italy. **Energy Policy**, v. 56, p. 663-671, 2013.
- MAHMOOD, H; ALKHATEEB, T.T.Y; FURQAN, M. Exports, imports, foreign direct investment and CO2 emissions in North Africa: Spatial analysis. **Energy Reports**, v. 6, p. 2403-2409, 2020.
- MAMAT, R., SANI, M. S. M., & SUDHAKAR, K. J. S. O. T. T. E. Renewable energy in Southeast Asia: Policies and recommendations. **Science of the total environment**, v. 670, p. 1095-1102, 2019.

- MENGIST, W., SOROMESSA, T., & LEGESE, G..Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. **MethodsX**, v. 7, p. 100777, 2020.
- MOHAMED, S. A. Application of geo-spatial Analytical Hierarchy Process and multi-criteria analysis for site suitability of the desalination solar stations in Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, v. 164, p. 103767, 1 abr. 2020.
- MOHANTY, S., PATRA, P. K., SAHOO, S. S., & MOHANTY, A.. Forecasting of solar energy with application for a growing economy like India: Survey and implication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 539-553, 2017.
- MOLNÁR, G; ÜRGE-VORSATZ, D; CHATTERJEE, S. Estimating the global technical potential of building-integrated solar energy production using a high-resolution geospatial model. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134133, 2022.
- MORAL-MUÑOZ, J. A., HERRERA-VIEDMA, E., SANTISTEBAN-ESPEJO, A., & COBO, M. J. Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. **Profesional de la Información**, v. 29, n. 1, 2020.
- MORIOKA, S. N., BOLIS, I., & DE CARVALHO, M. M.. From an ideal dream towards reality analysis: Proposing Sustainable Value Exchange Matrix (SVEM) from systematic literature review on sustainable business models and face validation. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 76-88, 2018.
- MUKHERJEE, D., LIM, W. M., KUMAR, S., & DONTU, N.. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research. **Journal of Business Research**, v. 148, p. 101-115, 2022.
- MUSIAŁ, W., ZIOŁO, M., LUTY, L., & MUSIAŁ, K.. Energy Policy of European Union Member States in the Context of Renewable Energy Sources Development. **Energies**, v. 14, n. 10, p. 2864, 2021.
- NCHOFONG, T. N.; FOTIO, H. K.; MIAMO, C. W. Green taxation and renewable energy technologies adoption: A global evidence. **Renewable Energy Focus**, v. 44, p. 334–343, 2023.
- NEUPANE, D., KAFLE, S., KARKI, K. R., KIM, D. H., & PRADHAN, P. Solar and wind energy potential assessment at provincial level in Nepal: Geospatial and economic analysis. **Renewable Energy**, v. 181, p. 278-291, 2022.
- NIÑEROLA, A.; SÁNCHEZ-REBULL, M.-V.; HERNÁNDEZ-LARA, A.-B. Six Sigma literature: a bibliometric analysis. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 32, n. 9–10, p. 959–980, 2021.
- NJOH, A. J., ETTA, S., NGYAH-ETCHUTAMBE, I. B., ENOMAH, L. E., TABREY, H. T., & ESSIA, U. Opportunities and challenges to rural renewable energy projects in Africa: Lessons from the Esaghem Village, Cameroon solar electrification project. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1013–1021, 2019.
- NORDHOLM, A; SAREEN, S. Scalar containment of energy justice and its democratic discontents: solar power and energy poverty alleviation. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 3, p. 626683, 2021.
- NUNES, A. M. M., COELHO JUNIOR, L. M., ABRAHÃO, R., SANTOS JÚNIOR, E. P., SIMIONI, F. J., ROTELLA JUNIOR, P., & ROCHA, L. C. S. Public Policies for Renewable

Energy: A Review of the Perspectives for a Circular Economy. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 485, 2023.

SUCHEK, N., FERNANDES, C. I., KRAUS, S., FILSER, M., & SJÖGRÉN, H.. Innovation and the circular economy: A systematic literature review. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 3686-3702, 2021.

OLANIPEKUN, I. O.; OZKAN, O.; OLASEHINDE-WILLIAMS, G. Is renewable energy use lowering resource-related uncertainties? **Energy**, v. 271, p. 126949, 15 maio 2023.

OLNER, D., MITCHELL, G., HEPPENSTALL, A., & PRYCE, G. The spatial economics of energy justice: modelling the trade impacts of increased transport costs in a low carbon transition and the implications for UK regional inequality. **Energy Policy**, v. 140, p. 111378, 1 maio 2020.

OWEN, Anthony D. Environmental externalities, market distortions and the economics of renewable energy technologies. **The Energy Journal**, v. 25, n. 3, 2004.

OZOEGWU, Chigbogu G.; AKPAN, Patrick U. A review and appraisal of Nigeria's solar energy policy objectives and strategies against the backdrop of the renewable energy policy of the Economic Community of West African States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, p. 110887, 2021.

PATWA, N., SIVARAJAH, U., SEETHARAMAN, A., SARKAR, S., MAITI, K., & HINGORANI, K. Towards a circular economy: An emerging economies context. **Journal of Business Research**, v. 122, p. 725-735, 2021.

PEIDONG, Z., YANLI, Y., JIN, S., YONGHONG, Z., LISHENG, W., & XINRONG, L. Opportunities and challenges for renewable energy policy in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 439-449, 2009.

PIRES, A. L. G., ROTELLA JUNIOR, P., MORIOKA, S. N., ROCHA, L. C. S., & BOLIS, I. Main trends and criteria adopted in economic feasibility studies of offshore wind energy: A Systematic Literature Review. **Energies**, v. 15, n. 1, p. 12, 2021.

RAMIREZ CAMARGO, L.; STOEGLEHNER, G. Spatiotemporal modelling for integrated spatial and energy planning. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 32, 2018.

RENOU-MAISSANT, P; ABDESSELAM, R; BONNET, J. Trajectories for Energy Transition in EU-28 Countries over the Period 2000–2019: a Multidimensional Approach. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 27, n. 3, p. 525-551, 2022.

ROTELLA JUNIOR, P., ROCHA, L. C. S., MORIOKA, S. N., BOLIS, I., CHICCO, G., MAZZA, A., & JANDA, K.. Economic Analysis of the Investments in Battery Energy Storage Systems: Review and Current Perspectives. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2503, 2021.

RONZON, T., PIOTROWSKI, S., TAMOSIUNAS, S., DAMMER, L., CARUS, M., & M'BAREK, R.. Developments of economic growth and employment in bioeconomy sectors across the EU. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4507, 2020.

SAHOO, S., ZUIDEMA, C., VAN STRALEN, J. N., SIJM, J., & FAAIJ, A. Detailed spatial analysis of renewables' potential and heat: A study of Groningen Province in the northern Netherlands. **Applied Energy**, v. 318, p. 119149, 2022.

SAWHNEY, A; RAHUL, M. Examining the regional pattern of renewable energy CDM power projects in India. **Energy Economics**, v. 42, p. 240-247, 2014.

SCARAMUZZINO, C.; GAREGNANI, G.; ZAMBELLI, P. Integrated approach for the identification of spatial patterns related to renewable energy potential in European territories. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 1–13, 2019.

SCHELL, K. R.; CLARO, J; FISCHBECK, P. Geographic attribution of an electricity system renewable energy target: Local economic, social and environmental tradeoffs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 884-902, 2015.

SCHUNDER, T., YIN, D., BAGCHI-SEN, S., & RAJAN, K. A spatial analysis of the development potential of rooftop and community solar energy. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 19, p. 100355, 2020.

SEHNEM, S., NDUBISI, N. O., PRESCHLAK, D., BERNARDY, R. J., & SANTOS JUNIOR, S. Circular economy in the wine chain production: maturity, challenges, and lessons from an emerging economy perspective. **Production Planning & Control**, v. 31, n. 11–12, p. 1014–1034, 2020.

SERMARINI, A. C. P, AZEVEDO, J. H. P., DE ALBUQUERQUE, V. C., CALILI, R. F., GONÇALVES, F., & JANNUZZI, G Distributed energy resources in low-income communities: A public policy proposal for Brazil. **Energy Policy**, v. 187, p. 114030, 2024.

SEVERIANO, C. A., E SILVA, P. C. D. L., COHEN, M. W., & GUIMARÃES, F. G.. Evolving fuzzy time series for spatio-temporal forecasting in renewable energy systems. **Renewable Energy**, v. 171, p. 764–783, 1 jun. 2021.

SHARMA, A.; BANERJEE, R. Framework to analyze the spatial distribution of the labor impacts of clean energy transitions. **Energy Policy**, v. 150, p. 112158, 1 mar. 2021.

SHAHNAZI, R; SHABANI, Z. D. Do renewable energy production spillovers matter in the EU?. **Renewable Energy**, v. 150, p. 786-796, 2020.

SHENG, M. S., SREENIVASAN, A. V., SHARP, B., & DU, B. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions and energy consumption for electric vehicles: A comparative study in Oceania. **Energy Policy**, v. 158, p. 112552, 2021.

SIMPSON, G.; CLIFTON, J. Subsidies for residential solar photovoltaic energy systems in Western Australia: Distributional, procedural and outcome justice. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 262–273, 2016.

TANG, Z., SUN, G., FU, M., WEN, C., & PLENKOVIĆ-MORAJ, A.. Research on the industrial energy eco-efficiency evolution characteristics of the Yangtze River Economic Belt in the temporal and spatial dimension, china. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 1, p. 268, 2020.

TIWARI, Rahul; SHARMA, Yashswani. Public policies to promote renewable energy technologies: Learning from Indian experiences. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 366-371, 2022.

TÖBBEN, J. Regional net impacts and social distribution effects of promoting renewable energies in Germany. **Ecological Economics**, v. 135, p. 195-208, 2017.

TORTORELLA, GL, FOGLIATTO, FS, SAURIN, TA, TONETTO, LM E MCFARLANE Contributions of Healthcare 4.0 digital applications to the resilience of healthcare organizations during the COVID-19 outbreak. **Technovation**, v. 111, p. 102379, 2022.

- WAIGANJO, M.; GODINIC, D.; OBRENOVIC, B. Strategic planning and sustainable innovation during the COVID-19 pandemic: a literature review. **International Journal of Innovation and Economic Development**, v. 7, n. 5, p. 52-59, 2021.
- WANG, C., FENG, K., LIU, X., WANG, P., CHEN, W. Q., & LI, J. Looming challenge of photovoltaic waste under China's solar ambition: A spatial-temporal assessment. **Applied Energy**, v. 307, p. 118186, 2022.
- WANG, H.W.; DODD, A; KO, Y. Resolving the conflict of greens: A GIS-based and participatory least-conflict siting framework for solar energy development in southwest Taiwan. **Renewable Energy**, v. 197, p. 879-892, 2022.
- WANG, K. H., LIU, L., ZHONG, Y., & LOBONT, O. R.. Economic policy uncertainty and carbon emission trading market: A China's perspective. **Energy Economics**, v. 115, p. 106342, 2022.
- WANG, Q., KWAN, M. P., FAN, J., ZHOU, K., & WANG, Y. F.. A study on the spatial distribution of the renewable energy industries in China and their driving factors. **Renewable Energy**, v. 139, p. 161-175, 2019.
- WHITE, M.D; MARSH, E. E. Content analysis: A flexible methodology. **Library trends**, v. 55, n. 1, p. 22-45, 2006.
- XIAO, Y., & WATSON, M.. Guidance on conducting a systematic literature review. **Journal of Planning Education And Research**, v. 39, n. 1, p. 93-112, 2019.
- XU, J., LV, T., HOU, X., DENG, X., LI, N., & LIU, F. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of renewable energy production in China: A spatial econometric analysis. **Energy Economics**, v. 116, p. 106399, 2022.
- XU, Y; CHEN, P. Energy transition and regional heterogeneity of environmental taxation in China: From the perspective of emission reduction effects. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 944131, 2022.
- YAN, L. I., ZHANG, Q., GE, W. A. N. G., & XI, L. U. Recycling schemes and supporting policies modeling for photovoltaic modules considering heterogeneous risks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106165, 2022.
- YI, T., TONG, L., QIU, M., & LIU, J.. Analysis of Driving Factors of Photovoltaic Power Generation Efficiency: A Case Study in China. **Energies**, v. 12, n. 3, p. 355, 2019.
- YU, B., FANG, D., YU, H., & ZHAO, C. Temporal-spatial determinants of renewable energy penetration in electricity production: Evidence from EU countries. **Renewable Energy**, v. 180, p. 438-451, 1 dez. 2021.
- YU, B.; FANG, D.; MENG, J. Analysis of the generation efficiency of disaggregated renewable energy and its spatial heterogeneity influencing factors: A case study of China. **Energy**, v. 234, p. 121295, 1 nov. 2021.
- ZACHO, K. O.; MOSGAARD, M. A. Understanding the role of waste prevention in local waste management: A literature review. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 10, p. 980-994, 2016.
- ZAHARAN, S., BRODY, S. D., VEDLITZ, A., LACY, M. G., & SCHELLY, C. L.. Greening Local Energy: Explaining the Geographic Distribution of Household Solar Energy Use in the United States. **Journal of the American Planning Association**, v. 74, n. 4, p. 419-434, 21 out. 2008.

ZHANG, L., WENG, D., XU, Y., HONG, B., WANG, S., HU, X., WANG, Z. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from road transportation in the mainland of China from 2006 to 2021. **Science of the Total Environment**, v. 917, p. 170430, 2024.

ZHANG, L.; ZHANG, Q; RAFIQ, M.A. The economic and environmental analysis of solar energy development under climate impacts. **Science Progress**, v. 105, n. 3, p. 00368504221124065, 2022.

ZHENG, S.; YANG, J.; YU, S. How renewable energy technological innovation promotes renewable power generation: Evidence from China's provincial panel data. **Renewable Energy**, v. 177, p. 1394–1407, 2021.

ZHONG, Z., ZHANG, Y., SHEN, H., & LI, X. Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121394, 2020.

ZHUANG, X; PAN, L. Study on the Impact of Clean Power Investment on Regional High-Quality Economic Development in China. **Energies**, v. 15, n. 22, p. 8364, 2022.

3 ARTIGO 2 – ANÁLISE REGIONAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO BRASIL SOB OS ÍNDICES DE HOOVER E KRUGMAN

RESUMO

Este artigo analisou a localização e concentração da geração distribuída - GD fotovoltaica no Brasil, no período de 2008 a 2021. Utilizou a potência instalada dos estados brasileiros, em quilowatts (kW), disponível na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), dividida em microgeração (menor que 75 kW) e minigeração (entre 75 kW e 5 MW). Verificou a evolução e comparou a potência instalada com a potência instalada por populacional nas unidades de federação e regiões brasileiras. Para análise regional da geração distribuída fotovoltaica utilizou os seguintes indicadores: índice de Hoover (H) e índice de dessemelhança de Krugman (SI). O uso da tecnologia no Brasil mostrou crescimento exponencial desde 2020, impulsionado pela implementação da nova bandeira tarifária pela ANEEL causada pela escassez hídrica. Minas Gerais foi como líder do uso da tecnologia como consequência do seu pioneirismo no país, chegando a 1.154 MW de potência instalada em 2021. O H tem valor médio maior na análise estadual do que na regional, pois apresenta valor concentrado. Para microgeração, o ano com menor concentração foi 2014 (0,3088) e maior foi 2012 (0,5303), em decorrência da alta concentração de potência no estado de Minas Gerais. Para a minigeração, o maior valor do H foi em 2014 (0,4146), que reflete a grande concentração de sistemas de minigeração no Nordeste do país, e o menor valor foi em 2021 (0,1917). O SI interferiu que Minas Gerais e Sudeste são as referências mais comuns para a potência instalada, já a potência instalada populacional não possui padrão para as referências. Em 2016, a região Nordeste destacou-se por diferir da referência, por ser a única região com instalação de minigeração. Conclui-se que tais evidências contribuem para orientação de política públicas e a tomada de decisão indicando onde o mercado da geração distribuída fotovoltaica está mais aquecido.

Palavras-chave: Energia limpa, energia solar, Economia da energia, estudo de mercado.

ARTICLE 2 – REGIONAL ANALYSIS OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION IN BRAZIL UNDER THE HOOVER AND KRUGMAN INDICATORS

ABSTRACT

This article analyzed the location and concentration of distributed generation - photovoltaic DG in Brazil, from 2008 to 2021. It used the installed power of Brazilian states, in kilowatts (kW), available at the National Electric Energy Agency (ANEEL), divided into microgeneration (less than 75 kW) and minigeneration (between 75 kW and 5 MW). It verified the evolution and compared the installed power with the installed power per population in the Brazilian federation units and regions. For regional analysis of photovoltaic distributed generation, the following indicators were used: Hoover index (H) and Krugman dissimilarity index (SI). The use of technology in Brazil has shown exponential growth since 2020, driven by the implementation of the new tariff flag by ANEEL caused by water scarcity. Minas Gerais was a leader in the use of technology as a result of its pioneering spirit in the country, reaching 1,154 MW of installed power in 2021. H has a higher average value in the state analysis than in the regional analysis, as it presents a concentrated value. For microgeneration, the year with the lowest concentration was 2014 (0.3088) and the highest was 2012 (0.5303), due to the high concentration of power in the state of Minas Gerais. For minigeneration, the highest H value was in 2014 (0.4146), which reflects the large concentration of minigeneration systems in the Northeast of the country, and the lowest value was in 2021 (0.1917). The SI stated that Minas Gerais and the Southeast are the most common references for installed power, whereas population installed power does not have a standard for references. In 2016, the Northeast region stood out for differing from the reference, as it was the only region with a minigeneration installation. It is concluded that such evidence contributes to public policy guidance and decision-making indicating where the photovoltaic distributed generation market is most heated.

Keywords: Clean energy, solar energy, Energy economics, market study.

3.1 INTRODUÇÃO

As fontes renováveis têm um papel cada vez mais evidente no cenário mundial. A energia solar fotovoltaica, em particular, desempenha papel menos poluentes que os combustíveis fósseis, por ser mais limpa e segura (GHAZOUANI, 2022; SHRESTHA et al., 2022). Esta fonte renovável contribui para o acesso global à energia acessível, confiável e sustentável até 2030, atendendo o ODS-7, dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. Em 2022, a matriz elétrica mundial era de 28 mil TWh, sendo 29,58% energias renováveis e 4,55% de energia solar fotovoltaica, detendo 1,06 TW de capacidade instalada. A China estava no topo do *ranking* mundial da capacidade instalada com 392 GW, seguida dos Estados Unidos (111 GW) e Japão (83 GW), o Brasil esteve na oitava posição com 24 GW (*International Energy Agency – IEA*, 2022). Em 2022, a matriz elétrica brasileira foi uma das mais limpas do mundo, gerando 677 TWh sendo 82,9% com energias renováveis (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2023).

Diante da crescente demanda energética, a geração solar fotovoltaica auxilia na oferta de energia, devido a capacidade tecnológica existente, baixa manutenção e menos agressiva ao meio ambiente (AGRAWAL et al. , 2022; AL-DOUSARI et al., 2019; GEBARA; LAURENT, 2023). O uso da tecnologia fotovoltaica pode ocorrer de por meio da geração centralizada e Geração Distribuída. A primeira engloba grandes usinas e a segunda caracteriza os sistemas em pequena escala, localizados próximos à carga que alimentam (KABALCI et al., 2021; MEHIGAN et al., 2018).

A energia solar fotovoltaica representava 4,4% da matriz elétrica brasileira e 24 GW de capacidade instalada (GIELEN et al., 2019; INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023). O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2022) e a EPE (2022) apresentaram que, em 2021, a energia solar fotovoltaica no Brasil era de 14,5 GW de capacidade instalada, sendo 69% de geração distribuída - GD e 31% de geração centralizada. A GD recebeu incentivo governamental através Resolução Normativa 482/2012 e 687/2015 da ANEEL. A EPE (2022) mostrou que em 2021 aproximadamente 5.430 cidades somavam 10 GW de capacidade instalada de GD fotovoltaica distribuídos em 803.760 sistemas de geração. A região Sudeste apresentou maior capacidade instalada do Brasil com 5,9 GW, seguida da região Sul (5 GW) e Nordeste (3,4 GW). Os estados brasileiros com maior capacidade instalada de GD fotovoltaica foram Minas Gerais (1,5 GW), São Paulo (1,15 GW), que nos dois estados têm cerca de 130 mil unidades geradoras instalados em cada estado, e o Rio Grande do Sul (1,06 GW) com aproximadamente 108 mil unidades geradoras instalados.

A expansão solar fotovoltaica no Brasil influencia no desenvolvimento econômico regional, promovendo emprego e renda ao setor energético. A economia regional auxilia a caracterizar uma atividade produtiva identificando padrões e compreendendo a estrutura de mercado, em um determinado local e um período. Sob estes aspectos mostram como agem as forças de mercado que determinam a localização e a organização geográfica de uma atividade econômica, inferindo aglomeração ou dispersão espacial (BUSU, 2020; FLORIDA; ADLER, 2020). O estudo da concentração e localização de um setor econômico visa compreender a relação entre organizações e como afeta a concorrência. Entre os indicadores de economia regional, os índices de Hoover e de dessemelhança de Krugman são ferramentas úteis para identificar o grau de concentração e dispersão em uma área geográfica e elas se relacionam entre si (MALECKI, 2015; POSSAS, 1999; SANTOS JÚNIOR et al., 2022; TAKAHASHI, 2022).

Os estudos de concentração podem ser utilizados em diversas áreas como Steeves et al. (2015) que investigaram a interiorização da violência brasileira, policiamento e crescimento econômico com a análise de distribuição espacial; Hossain e Meng (2020) mapearam e entenderam os potenciais perigos e riscos urbanos proporcionados pelas inundações; Abdelkader e Hamidouche (2020) procuraram compreender os agregados econômicos, a nível espacial, para conhecer as características de cada região geográfica do reino da Arábia Saudita; Sinicakova e Stiblarova (2016) identificaram a sincronização do ciclo econômico regional nos países de Visegrad, Polônia, República Tcheca, Eslováquia e Hungria. Poucos estudos foram realizados sobre a dinâmica da oferta e disponibilidade das fontes energéticas no Brasil, considerando os aspectos espaciais e temporais dessas atividades econômicas. Santos Júnior et al. (2022) analisaram a exploração da oferta da bioeletricidade no Brasil para explicar a evolução deste recurso e Coelho Junior e Santos Júnior (2022) trouxeram uma avaliação espaço-temporal da bioeletricidade para evidenciar a expansão do setor. Estas análises focaram na bioeletricidade, restando uma lacuna para entender o mercado nacional, variações e impactos regionais da GD fotovoltaica no Brasil.

Em busca de compreender o mercado fotovoltaico brasileiro, seus efeitos regionais e do uso da tecnologia, este artigo utilizou uma metodologia para analisar a localização e concentração da capacidade instalada da GD fotovoltaica no Brasil, de 2008 a 2021. Os resultados irão contribuir para dar suporte às novas políticas públicas e a tomada de decisão no setor energético, além de avaliar a diversidade da matriz elétrica em outros países.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Objeto de estudo

Os dados das unidades geradoras em potência instalada, quilowatt (kW), foram fornecidos pela Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração (SCG) e disponíveis pelo Sistema de Informações (SIGA) da ANEEL, de 2008 a 2021. Estas informações foram agrupadas por recortes regionais: unidades da federação (estados) e regiões brasileiras. Segundo as Resolução Normativas da ANEEL 687/2015 determinou a geração distribuída sob duas formas: microgeração sendo qualquer central geradora com potência instalada menor que 75 kW e; minigeração sendo um sistema gerador de energia elétrica que possui potência instalada igual ou superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW (ANEEL, 2015).

Para corrigir as discrepâncias regionais e investigar sua evolução calculou-se a potência instalada populacional da GD fotovoltaica, Equação 3.1.

$$PGDP_i = kW_i / 1.000 \text{ hab}_i \quad (3.1)$$

em que, $PGDP_i$ é a potência instalada da GD fotovoltaica populacional da região i e Pop_t é a população total; kW_i é a potência instalada da GD fotovoltaica populacional da região i ; hab_i são os habitantes da região i .

A região de estudo foi determinada pelos recortes geográficos da divisão territorial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) que divide a área analisada em regiões federativas e estados do Brasil, de acordo com a Figura 3.1.

Utilizou-se os dados populacionais de 2000 e 2021 disponíveis do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) para calcular a taxa de crescimento populacional com base na taxa geométrica de crescimento (TGC), Equação 3.2, e estimou-se a população dos recortes regionais do Brasil para o período de 2008 a 2020 (IBGE 2000; 2021).

$$TGC = \left[\sqrt[\Delta t]{\frac{P_f}{P_0}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (3.2)$$

em que: P_f = população da região no ano final; P_0 = população da região no ano inicial; Δt = variação do tempo em anos.

Para caracterizar a evolução da potência instalada e potência instalada populacional da GD fotovoltaica do Brasil, foi considerado o período entre 2008 e 2021 para instalações de micro e minigeração. Também utilizou potência instalada e potência

instalada populacional da GD fotovoltaica para os estados e regiões brasileiras, considerando os anos de 2008, 2012, 2016, 2020 e 2021. Para mensurar ganhos e perdas foi empregada TGC.

Figura 3.1. Localização do Brasil na América do Sul.



Fonte: Os autores (2024).

3.2.2 Medidas locais

As medidas locais utilizadas foram o índice de Hoover (H) e índice de dessemelhança de Krugman (SI). O índice de Hoover (H) investiga a predisposição de concentração de uma distribuição populacional em progresso em uma região, assim como mensura a desigualdade para identificar a evolução da distribuição (ADAMIÁK et al., 2019). Foi utilizada esta metodologia para quantificar a desigualdade na distribuição da potência instalada nos recortes geográficos, sendo uma boa opção pela sua aplicabilidade em diferentes escalas, fornecendo análises locais, regionais ou globais, conforme Santos Júnior et al. (2022).

O índice de Hoover (H), definido na Equação 3.3, foi usado para medir a concentração da GD fotovoltaica nos recortes regionais.

$$H = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left| p_i - \frac{1}{n} \right| \quad (3.3)$$

em que, p_i é a participação da potência instalada de GD fotovoltaica no Brasil, i é a região observada, n é a quantidade de regiões participantes. O índice de Hoover varia de 0 a 1, sendo 0 baixa concentração com distribuição uniforme e 1, alta concentração com monopólio (LONG; NUCCI, 1997).

O índice de dessemelhança de Krugman (SI), definido na Equação 3.4, relaciona a mesma variável em duas regiões diferentes de mesma ordem, em que uma é referência com recorte regional de maior potência instalada. Esta análise de dessemelhança espacial pode fornecer *insights* relevantes para desenvolver políticas públicas, identificando áreas que precisam de infraestrutura energética e investimento, a fim de promover uma distribuição equitativa da potência instalada. O índice foi calculado ano a ano, posteriormente elaborado mapas com o auxílio do *software* QGIS.

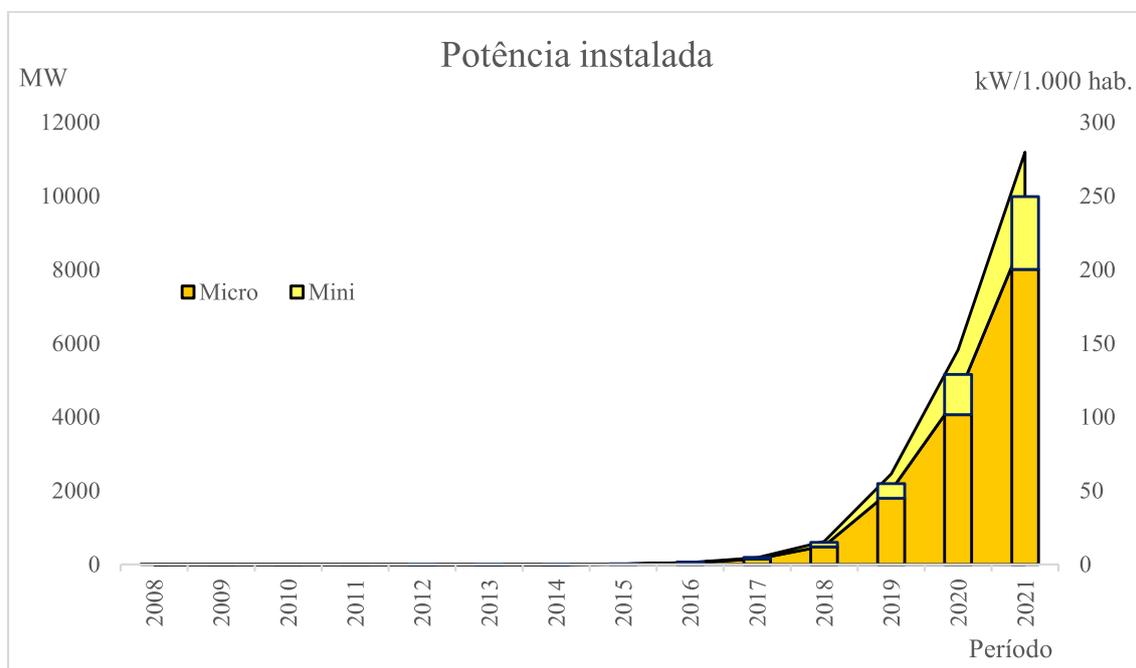
$$SI_{ij} = \sum_k \left| \frac{E_{ki}}{E_i} - \frac{E_{kj}}{E_j} \right| \quad (3.4)$$

em que E_{ki} é a capacidade instalada, em kW, no setor k no local de análise i ; E_i é a capacidade instalada total no local de análise i ; E_{kj} é a capacidade instalada no setor k de referência j ; E_j é a capacidade instalada total no local de referência j ; e k são os grupos de tensão. O índice pode variar entre 0 e 2. Sendo mais próximo a 0, mais semelhante a referência, mais distante, menos semelhante.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3.2 é apresentada a evolução da potência instalada e a potência instalada populacional para GD da fotovoltaica no Brasil no período de 2008 a 2021. Em 2008, a potência instalada para microgeração atingiu 0,025 MW, enquanto a potência instalada populacional foi de 0,00031 kW/1.000 hab. Em 2012, observou significativo aumento na potência instalada, alcançando 0,645 MW, com aumento de 92% a.a., em relação a 2008. No mesmo período, a potência instalada populacional para microgeração registrou 0,016 kW/1.000 hab., com crescimento de 122% a.a., em comparação ao ano inicial. Cabe ressaltar que o ano de 2012 marcou o início das instalações de minigeração, e este marco pode ser atribuído à disseminação da tecnologia, influenciada pela Resolução 482/2012, que regulamentou tanto a microgeração quanto a minigeração.

Figura 3.2: Evolução da GD Fotovoltaica no Brasil para a potência instalada (MW) e potência instalada populacional (kW / 1.000 hab.) da mini e microgeração, de 2008 a 2021.



Fonte: ANEEL (2022), IBGE (2000; 2021).

Em 2015, houve um notável crescimento na potência instalada total, registrando um aumento de 115% ao ano em relação a 2012, indo de 0,64 MW para 13,88 MW. Este incremento foi observado tanto na microgeração, que teve crescimento de 153% a.a., quanto na minigeração, que apresentou um aumento de 77,78% a.a. No mesmo período, a potência instalada populacional total expandiu-se em 106% a.a, com a microgeração crescendo a uma taxa de 123% a.a. e a minigeração a uma taxa de 78% a.a. Um marco relevante nesse cenário foi a promulgação da Resolução 687/2015, que introduziu o sistema de compensação de energia, ampliou o prazo dos créditos energéticos e aumentou a potência máxima de 1 MW para 5 MW. Esta resolução desempenhou um papel significativo no estímulo ao aumento da potência instalada e potência instalada populacional, por meio dos incentivos disponibilizados.

Entre 2020 e 2021, as curvas começaram a ter comportamentos exponenciais, em decorrência da alta procura a este tipo de sistema de geração em decorrência do alto valor pago pela energia elétrica. A ANEEL criou a bandeira tarifária (bandeira roxa) como consequência da escassez hídrica e possibilidade de apagão, cobrando R\$ 14,20 extra por cada 100 kWh consumido. No ano de 2021, observou um substancial aumento na potência

instalada totalizando 9.988 MW, alcançando um crescimento anual de 156% a.a. em comparação a 2015. A microgeração atingiu uma potência instalada de 8.013 MW, chegando a 160% a.a., enquanto a minigeração registrou 1.974 MW em 2021, com crescimento de 142% a.a., entre 2015 e 2021. A potência instalada populacional total cresceu 165% a.a. (variando de 0,30 para 279,80 kW/1.000 hab) no mesmo período, enquanto a microgeração cresceu 168% a.a. (variando de 0,22 para 223,85 kW/1.000 hab) e a minigeração cresceu 157% a.a. (variando de 0,07 para 55,95 kW/1.000 hab)

A potência instalada populacional (kW/1.000 hab.) registrou notável avanço, impulsionado pelo aumento da capacidade de geração de energia, enquanto a influência da população no índice permaneceu relativamente modesta. Isso destaca os avanços tecnológicos e as melhorias na eficiência energética que contribuíram significativamente para esta evolução, tornando um reflexo mais preciso da capacidade de fornecimento de energia de uma região em relação ao seu tamanho populacional. A microgeração teve maior evolução e potência instalada, pois já existia antes da regulamentação com Resolução Normativa 482, diferente da minigeração que só surgiu após a resolução que definiu limites para a GD. A potência instalada populacional também apresentou comportamento exponencial, pois embora a população regional tenha mudado, a potência instalada da GD fotovoltaica teve crescimento acelerado.

Ao analisar a potência instalada populacional, identificou-se as disparidades na distribuição dos recursos entre as regiões, o que sugere uma distribuição desigual da energia fotovoltaica. Isto pode indicar problemas relacionados à equidade na geração distribuída e é importante ressaltar que o acesso à energia moderna e serviços energéticos é fundamental para o desenvolvimento econômico e sustentável. No entanto, constatou-se que muitos países em desenvolvimento enfrentam dificuldades nesse aspecto, evidenciando a necessidade de políticas e medidas que promovam uma distribuição mais equitativa e inclusiva da energia (CHIRAMBO, 2016).

A Tabela 3.1 apresenta a potência instalada de GD Fotovoltaica, em MW, para sistemas de micro e minigeração das regiões e estados brasileiros de 2008 a 2021. Em 2008, a presença de sistemas de geração distribuída no país limitava-se à região Sudeste, mais especificamente, Minas Gerais, com 0,025 MW instalados. Em 2012, a região Nordeste destacou-se como a única a abrigar sistemas de minigeração com 0,403 MW de potência instalada na Bahia. Ao mesmo tempo, na região Sudeste, Minas Gerais continuou a liderar o *ranking* dos sistemas de microgeração, mantendo uma capacidade

instalada significativa de 0,108 MW. Na região Norte, o estado de Rondônia destacou-se com a maior capacidade instalada neste ano com 0,023 MW.

Tabela 3.6: Potência instalada de GD Fotovoltaica, em MW, para sistemas de micro e minigeração no Brasil, de 2008 a 2021.

	2008		2012		2016		2020		2021	
	Min	Mic	Min	Mic	Min	Mic	Min	Mic	Min	Mic
Sudeste		0,025		0,119	2,662	22,9555	424,663	1.387,261	764,392	2.627,735
Espírito Santo					0,099	0,950	21,191	62,413	29,438	130,316
Minas Gerais		0,025		0,108	1,504	10,643	260,955	674,695	452,816	1.154,255
Rio de Janeiro				0,011	0,524	4,521	35,997	155,528	85,771	321,859
São Paulo					0,534	6,841	106,519	494,623	196,365	1.021,303
Sul					1,702	12,772	160,621	1192,862	336,932	2.230,222
Paraná					0,226	4,078	41,641	438,338	118,221	767,126
Rio Grande do Sul					0,882	6,131	80,836	516,370	136,034	965,160
Santa Catarina					0,594	2,563	38,144	238,153	82,678	497,935
Nordeste			0,403	0,009	7,660	10,402	217,926	672,715	356,929	1.513,801
Alagoas						0,261	7,515	28,172	15,134	63,978
Bahia			0,403		0,403	1,212	25,494	141,266	38,319	332,422
Ceará					3,662	2,807	50,792	110,125	73,319	235,625
Maranhão					0,332	1,221	19,008	73,002	33,836	180,656
Paraíba					0,150	0,408	25,012	66,753	40,474	129,171
Pernambuco					1,955	1,408	45,921	86,713	74,796	207,884
Piauí				0,009	0,249	2,067	16,281	72,407	32,347	154,399
Rio Grande do Norte					0,907	0,901	23,851	65,268	41,031	160,629
Sergipe						0,118	4,049	29,004	7,669	49,034
Norte			0,034		0,928		38,861	211,721	82,895	491,319
Acre						0,0405	1,564	7,715	4,309	21,887
Amazonas						0,054	4,962	17,116	15,717	38,273
Amapá							2,792	3,286	4,607	8,979
Pará						0,224		92,315		215,735
Rondônia				0,023		0,309	11,289	33,466	28,646	86,373
Roraima						0,003	10,414	3,279	12,212	7,693
Tocantins				0,011		0,296	7,838	54,541	17,403	112,375
Centro-Oeste					0,079	1,408	2,991	242,460	598,769	403,859
Distrito Federal						0,559	0,80037	42,749	34,488	59,911
Goiás						0,549	0,74551	66,106	179,321	111,202
Mato Grosso						0,224	1,135	106,301	254,879	175,016
Mato Grosso do Sul					0,079	0,076	0,308	27,303	130,079	57,731
Brasil		0,025	0,403	0,242	11,731	37,276	923,910	2.870,466	1.608,077	5.786,286

Fonte: ANEEL (2022).

Por sua vez, no Centro-Oeste, Mato Grosso do Sul foi pioneiro na adoção de sistemas de microgeração com instalações que somavam 0,079 MW de potência instalada. Durante o intervalo de 2008 a 2012, a microgeração demonstrou um

crescimento significativo, evidenciando taxas de crescimento de 170% a.a. na região Centro-Oeste, 36% a.a. no Sudeste, 14% a.a. no Nordeste e 8% a.a. no Norte, enquanto não foram identificadas instalações na região Sul. O Estado do Mato Grosso do Sul registrou a maior taxa de crescimento, atingindo 170% a.a., enquanto Rondônia permaneceu estável, sem apresentar crescimento.

Em 2016, após a Resolução 482/2012 e 687/2015, o estado de Minas Gerais seguiu no topo dos estados da região Sudeste e em proporções nacional, pois atingiu a marca de 10,64 MW de microgeração. Na região Sul, o Rio Grande do Sul foi o estado com maior capacidade instalada de microgeração, com 6,13 MW, mostrando o quanto o estado avançou em pouco tempo. Neste ano, o estado do Ceará foi referência em minigeração, na região Nordeste e no Brasil, com capacidade instalada de 3,663 MW. O estado de Rondônia continuou sendo o maior gerador no Norte e no Centro-Oeste, Mato Grosso foi teve maior potência instalada de microgeração.

Entre 2012 e 2016, observou-se um notável incremento de 483% a.a. (de 0,009 MW para 10,40 MW) na capacidade instalada da microgeração, na região Nordeste, seguida pela região Sul com 315% a.a. (de 0,042 MW para 12,77 MW), Sudeste com 186% a.a. (de 0,12 MW para 22,95 MW), Centro-Oeste com 148% a.a. (de 0,079 MW para 2,99 MW) e Norte com 128% a.a. (de 0,079 MW para 2,99 MW). O Acre teve um crescimento de apenas 3% a.a. (de 0,038 MW para 0,041 MW), ao passo que o Rio Grande do Sul registrou uma taxa de crescimento de 483% a.a. (variando de 0,00529 MW para 6,13 MW). Para minigeração, a região Centro-Oeste destacou-se por registrar um aumento de 165% a.a. neste setor, seguida pelas regiões Sudeste e Nordeste, com crescimento de 94% a.a. e 80% a.a., respectivamente. O Ceará apresentou o maior crescimento, alcançando 351% a.a (de 0,18 MW para 3,66 MW).

Em 2020, o uso dos sistemas fotovoltaico aumentou devido a presença de nova bandeira tarifária (bandeira roxa) em decorrência da escassez hídrica, aumentando preço da tarifa da energia elétrica no Brasil. Neste ano, todos os estados já possuíam instalação de microgeração e apenas o Pará não possuía sistema de minigeração. Minas Gerais continuou sendo o estado com maior capacidade instalada (674,7 MW) da região Sudeste e Brasil, para sistemas de microgeração e chegou ao topo da capacidade instalada de minigeração (260,96 MW). Na região Sul, o Rio Grande do Sul teve maior capacidade instalada de sistemas de micro (80,84 MW) e minigeração (516,37 MW). Para o Nordeste, a região com maior capacidade instalada para sistemas de microgeração foi a Bahia (141,27 MW) e de minigeração o Ceará (50,79 MW). Na região Norte, o Pará teve

destaque nos sistemas de microgeração (92,32 MW) e Rondônia, nos sistemas de minigeração (11,29 MW). No Centro-Oeste, o topo do *ranking* ficou para o Mato Grosso (254,88 MW para microgeração e 106,3 MW para minigeração).

De 2016 a 2020, para os sistemas de microgeração, a região com maior taxa de crescimento foi a região Norte com 288% a.a. (de 0,92 MW para 211,72 MW), seguida da região Centro-Oeste com 276% a.a. de aumento (de 2,99 MW para 246,10 MW), Sul com 210% a.a. (de 12,77 MW para 592,84 MW), Nordeste com 183% a.a. (de 10,40 MW para 672,71 MW) e Sudeste com 178% a.a. (de 229,55 MW para 1.387,26 MW). Todos os estados apresentaram taxas de crescimento positivas, variando de 103% a.a., no Piauí, a 306% a.a., em Roraima. Para minigeração, a região Norte evidenciou o maior índice de com um incremento de 205% a.a. (de 0,58 MW para 50,87 MW), seguida pelas regiões Centro-Oeste com 180% a.a. (de 1,41 MW para 242,46 MW), Sudeste com 176% a.a. (de 2,66 MW para 424,66 MW), Sul com 149% a.a. (de 1,70 MW para 159,06 MW) e Nordeste com 95% a.a. (de 7,66 MW para 217,92 MW). O Amazonas registrou um crescimento expressivo (513% a.a.), indo de 0,13 MW para 4,96 MW, devido ao seu contínuo desenvolvimento, permanecendo como destaque também entre 2020 e 2021.

Em 2021, Minas Gerais lideram os estados do Sudeste e Brasil, para micro (1.154,24 MW) e minigeração (452,82 MW). Assim como para a região Sul, o Rio Grande do Sul que continuou no topo do *ranking* em sistemas de micro (965,16 MW) e minigeração (136,03 MW). No Nordeste, a Bahia continuou para microgeração (332,42 MW), mas para os sistemas de minigeração o Pernambuco teve maior capacidade instalada (74,79 MW). No Norte e Centro-Oeste, os estados com maiores capacidades instaladas seguiram sendo os mesmos de 2020.

Entre 2020 e 2021, para microgeração, o Norte teve maior taxa de crescimento variando de 211,72 MW para 491,31 MW (52%), seguida Nordeste com 50% (variando de 672,71 MW para 151,38 MW), e Centro-Oeste, Sudeste e Sul com 38,79% (variando de 598,76 MW para 115,34 MW), 37,63% (variando de 138,72 MW para 262,77 MW) e 36,68% (variando de 119,23 MW para 222,73 MW), respectivamente. Todos os estados mantiveram taxas de crescimento positivas, com o Acre registrando o maior crescimento, de 68% (variando de 7,71 MW para 21,88 MW) e o Distrito Federal com a menor taxa de crescimento, atingindo 29% (variando de 34,48 MW para 57,66 MW). Já para a minigeração, o Norte teve foi a região que mais cresceu, indo de 50,87 MW para 114,19 MW (50%), seguido do Sul com 45% que variou de 159,06 MW para 335,14 MW, e o Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste com taxa de crescimento de 34% (de 43,46 MW para

76,43 MW), 29% (de 242,46 MW para 403,85 MW) e 28% (de 217,91 MW para 35,69 MW). Os estados com maior crescimento foi o Amazonas (78%) e Acre (66%), os dois da região Norte, onde o mercado se estabeleceu de forma tardia e ainda está em processo de implementação. Esta distribuição geográfica evidencia a progressiva expansão da geração distribuída para diferentes regiões do Brasil, com estados específicos assumindo papéis proeminentes em termos de pioneirismo e capacidade instalada.

A taxa de crescimento geométrico foi ascendente no uso das instalações de microgeração em todo país em decorrência de diversos fatores como queda nos custos dos sistemas fotovoltaicos, incentivos e políticas governamentais e o desenvolvimento da conscientização sobre a sustentabilidade pela sociedade. O avanço do uso desta tecnologia em todos os estados foi notável devido às taxas de crescimento relevantes, impulsionadas pelas vantagens associadas ao uso, como a autossuficiência energética, permitindo aos consumidores reduzir sua dependência da rede elétrica convencional. Esse desenvolvimento também é reflexo da ampliação das linhas de crédito e financiamento específicas para a instalação de sistemas de Geração Distribuída, tornando-os mais acessíveis aos consumidores (ALI et al., 2022; RANI et al., 2024).

A Tabela 3.2 apresenta a potência instalada populacional ($\text{kW}/10^3 \text{ hab}$) da GD fotovoltaica para unidades geradores de micro e minigeração das regiões e estados brasileiros de 2008 a 2021. Em 2008, o único estado que teve potência instalada populacional de microgeração foi Minas Gerais ($0,001 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$), na região Sudeste. Em 2012, Minas Gerais continuou sendo no topo da região Sudeste para sistemas de microgeração ($0,005 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$). Na região Nordeste, o Piauí possuía maior capacidade instalada populacional para microgeração ($0,003 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$), enquanto que para minigeração, apenas a Bahia ($0,028 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$) tinha sistemas em todo o país. Entre 2008 a 2012, as instalações de microgeração por mil habitantes na região Centro-Oeste cresceram 170% a.a. Rondônia teve uma taxa de crescimento negativa (-2% a.a.) entre 2008 e 2012 (variando de $0,0154 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$ para $0,0148 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$), enquanto o Mato Grosso do Sul registrou o maior crescimento, atingindo 150% a.a (variando de $0,00163 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$ para $0,0253 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$).

Em 2016, Minas Gerais seguiu sendo destaque para a região Sudeste para os sistemas de micro ($0,507 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$) e minigeração ($0,072 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$). Na região Sul, Santa Catarina teve maior potência populacional de minigeração ($0,086 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$), enquanto o Rio Grande do Sul teve o destaque para microgeração ($0,543 \text{ kW}/10^3 \text{ hab}$). No Nordeste, o Ceará teve maior potência populacional de minigeração ($0,409 \text{ kW}/10^3$

hab), mas o topo do *ranking* para microgeração ficou com o Piauí (0,643 kW/10³ hab). No Norte, existiram apenas sistemas de microgeração e a maior potência populacional era do Tocantins (0,193 kW/10³ hab). No Centro-Oeste, o Distrito Federal teve maior capacidade instalada populacional de minigeração (0,188 kW/10³ hab) e de microgeração foi Mato Grosso (0,423 kW/10³ hab).

Tabela 3.7: Potência instalada populacional, em kW/1.000 hab, para as unidades geradoras de microgeração e minigeração das regiões e estados brasileiros, de 2008 a 2021.

	2008		2012		2016		2020		2021	
	Min	Mic	Min	Mic	Min	Mic	Min	Mic	Min	Mic
Sudeste		0,001		0,006	0,140	1,171	21,84	66,68	37,43	125,95
Espírito Santo					0,025	0,239	5,21	15,35	7,16	31,71
Minas Gerais		0,001		0,005	0,072	0,507	12,25	31,68	21,14	53,90
Rio de Janeiro				0,001	0,032	0,272	2,07	8,95	4,91	18,43
São Paulo					0,012	0,153	2,30	10,68	4,21	21,89
Sul					0,184	1,277	15,95	116,10	33,32	218,17
Paraná					0,020	0,363	3,61	38,06	10,19	66,15
Rio Grande do Sul					0,078	0,543	7,07	45,20	11,86	84,17
Santa Catarina					0,086	0,371	5,25	32,83	11,26	67,85
Nordeste				0,003	1,067	1,852	36,57	118,7	62,05	258,27
Alagoas						0,077	2,24	8,40	4,49	19,01
Bahia			0,028		0,026	0,079	1,71	9,46	2,55	22,18
Ceará					0,409	0,313	5,53	11,98	7,93	25,49
Maranhão					0,048	0,176	2,67	10,26	4,73	25,25
Paraíba					0,038	0,102	6,19	16,52	9,97	31,82
Pernambuco					0,208	0,150	4,77	9,01	7,73	21,48
Piauí				0,003	0,078	0,643	4,96	22,06	9,83	46,94
Rio Grande do Norte					0,261	0,259	6,74	18,46	11,52	45,11
Sergipe						0,052	1,74	12,50	3,28	20,96
Norte				0,022		0,463	33,88	85,25	59	197,19
Acre						0,050	1,74	8,62	4,75	24,13
Amazonas						0,014	1,17	4,06	3,68	8,96
Amapá							3,24	3,81	5,24	10,23
Pará						0,027		10,62		24,57
Rondônia				0,015		0,173	6,28	18,62	15,78	47,58
Roraima						0,006	16,49	5,19	18,71	11,78
Tocantins				0,008		0,193	4,92	34,29	10,82	69,91
Centro-Oeste				0,025	0,377	0,897	68,86	164,11	112,62	313,52
Distrito Federal					0,188	0,269	13,99	11,28	19,36	18,63
Goiás					0,082	0,111	9,29	25,21	15,43	46,43
Mato Grosso					0,084	0,423	37,83	90,72	61,64	171,86
Mato Grosso do Sul				0,025	0,023	0,093	7,74	36,88	16,18	76,58
Brasil		0,001		0,057	1,584	4,382	161,16	434,74	271,11	894,93

Fonte: ANEEL (2022), IBGE (2023).

Entre 2012 e 2016, para microgeração, houve um destaque para a região Nordeste, com crescimento de 475% a.a., que variou de 0,000167 kW/10³ hab para 0,182 kW/10³ hab. Enquanto a região Sudeste, apesar de possuir a maior capacidade instalada, registrou um crescimento de apenas 182% a.a., com variação de 0,00146 kW/10³ hab para 0,266 kW/10³ hab. O Acre teve um crescimento modesto (1,73%), ao passo que o Rio Grande do Sul se destacou com um crescimento de 482% a.a. (variando de 0,00047 kW/10³ hab para 0,543 kW/10³ hab). A taxa de minigeração populacional na região Centro-Oeste apresentou um crescimento de 162% a.a. (indo de 0,00499 kW/10³ hab para 0,089 kW/10³ hab), enquanto a Bahia e o Mato Grosso do Sul apresentaram taxas negativas, decorrentes do subdesenvolvimento na adoção da tecnologia, associado ao aumento populacional.

Em 2020, Minas Gerais seguiu como referência na região Sudeste, pois apesar da sua alta população, sua capacidade instalada é muito alta por consequência do pioneirismo do estado no Brasil. O Rio Grande do Sul teve a maior capacidade instalada populacional para micro (45,21 kW/10³ hab) e minigeração (7,08 kW/10³ hab) na região Sul. Na região Nordeste, Piauí teve maior potência instalada populacional na microgeração (22,06 kW/10³ hab), enquanto o Rio Grande do Norte assumiu posição proeminente na minigeração (6,75 kW/10³ hab). No Norte, o Tocantins continuou tendo a maior capacidade populacional da microgeração (34,29 kW/10³ hab), mas a minigeração se destacou no estado de Roraima (16,50 kW/10³ hab). Goiás teve maior capacidade instalada populacional para sistemas de micro e minigeração na região Centro-Oeste.

Entre 2016 a 2020, o Norte foi a região com o maior crescimento para os sistemas de microgeração (283% a.a.), indo de 0,0524 kW/10³ hab para 11,33 kW/10³ hab, assim como entre 2020 e 2021 (52% a.a.) que foi de 11,33 kW/10³ hab para 25,98 kW/10³ hab. Observa-se um maior destaque percentual nas regiões em que a capacidade instalada não é tão significativa, pois o mercado fotovoltaico ainda está em processo de estabelecimento. Todos os estados exibiram taxas de crescimento positivas superiores a 100% a.a., com Roraima se destacando ao crescer 290% a.a. (indo de 0,0057 kW/10³ hab para 5,19 kW/10³ hab). No período de 2020 a 2021, o estado do Acre registrou o maior crescimento, atingindo 67% a.a. (indo de 8,62 kW/10³ hab para 24,13 kW/10³ hab). Para os sistemas de minigeração, a região Norte destacou-se significativamente, registrando um aumento de 202% a.a. (variando entre 0,032 kW/10³ hab e 2,72 kW/10³ hab), mantendo esse destaque também de 2020 a 2021, com um crescimento de 48% a.a. (variando entre 2,72 kW/10³ hab e 6,03 kW/10³ hab). O Amazonas teve um crescimento de 503% a.a. com variação entre 0,183 kW/10³ hab e 1,17 kW/10³ hab, destacando-se

também entre 2020 e 2021, com 77% a.a. (indo de 1,17 kW/10³ hab para 3,68 kW/10³ hab).

Em 2021, Minas Gerais seguiu no topo do *ranking* na região Sudeste, assim como em todas as análises. O Rio Grande do Sul também seguiu sendo destaque na região Sul para sistemas de mini (11,86 kW/10³ hab) e microgeração (84,17 kW/10³ hab). O Piauí e Rio Grande do Norte seguiram se destacando em micro e minigeração, respectivamente, na região Nordeste. No Norte, Tocantins e Roraima, também continuaram tendo maior potência instalada populacional para micro e minigeração. Mato Grosso teve maior capacidade instalada no Centro-Oeste para sistemas de micro (171,87 kW/10³ hab) e minigeração (61,64 kW/10³ hab).

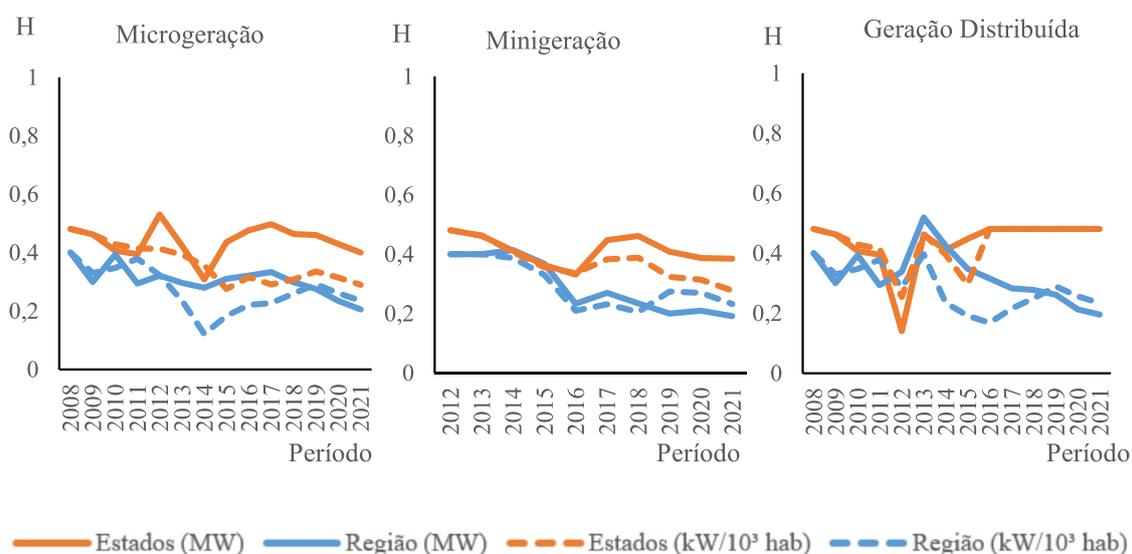
Ao analisar a evolução da potência instalada populacional, verificou-se uma distribuição não uniforme do uso da tecnologia pelas pessoas nos estados e regiões do Brasil. Isto pode ser reflexo dos estados não possuírem a mesma infraestrutura e desenvolvimento regional para investir neste setor, dificultando a implementação de sistemas e incentivos governamentais. A disponibilidade de investimentos públicos e privados também variam entre os estados e influenciam a instalação dos projetos. Para promover um acesso mais igualitário em todo o país, é necessário abordar esses desafios por meio de políticas e iniciativas que incentivem o desenvolvimento da energia solar distribuída em todas as regiões do país.

Na Figura 3.3, é apresentada a evolução do índice de Hoover no Brasil, para a potência instalada e potência instalada populacional de microgeração, minigeração e a geração distribuída total, de 2008 a 2021. Observou que a curva representando a microgeração a nível estadual demonstrou um valor médio superior em comparação às curvas das regiões. Este fenômeno se justificou pela análise regional, onde os sistemas exibem uma melhor distribuição, menos concentrada nas cinco regiões do Brasil. Os índices mais baixos registrados para as regiões que possuíram sistemas de microgeração ocorreram em 2021 (0,21), indicando menor concentração. Por outro lado, o índice mais elevado foi observado em 2008 (0,40), aumentando a concentração destas instalações na região Sudeste.

Quando se trata da questão estadual dos sistemas de microgeração, os valores são superiores, aproximando da unidade e mostrando uma tendência à concentração, por existirem mais estados e a divisão entre eles ser mais heterogênea que nas regiões. O ano com menor concentração foi 2014 (0,31) e maior concentração foi 2012 (0,53), reflexo

da alta concentração da potência no estado de Minas Gerais, por ser o estado pioneiro e com maior quantidade de sistemas instalados.

Figura 3.3: Evolução do índice de Hoover para a potência instalada, em MW, e potência instalada populacional, kW/1.000 hab., da GD fotovoltaica no Brasil, para 2008 a 2021, com a micro, minigeração e geração total.



Fonte: Os autores (2024).

O índice de Hoover da potência instalada populacional seguiu um padrão semelhante ao índice de concentração da potência instalada. Notoriamente, a curva que representou a potência instalada em nível estadual apresentou um valor médio superior à curva regional, refletindo uma alta concentração a nível estadual. No entanto, ficou evidente que as curvas que representam a potência populacional estavam posicionadas abaixo das curvas da potência instalada. Isso indica que, ao considerar a potência em relação à população, houve uma distribuição mais equitativa e menos tendência à monopolização.

Na minigeração, as curvas referentes aos estados e regiões apresentaram comportamento similar à microgeração. A GD fotovoltaica foi ganhando maiores proporções ao longo dos anos e adquirindo maior relevância no país, especialmente na minigeração que iniciou apenas em 2012. Em 2021, observou-se concentração fraca (0,1916) devido à aceitação da tecnologia fotovoltaica em todo o país, assim como Santos Júnior et al. (2022) observaram para a potência de bioeletricidade florestal dos estados

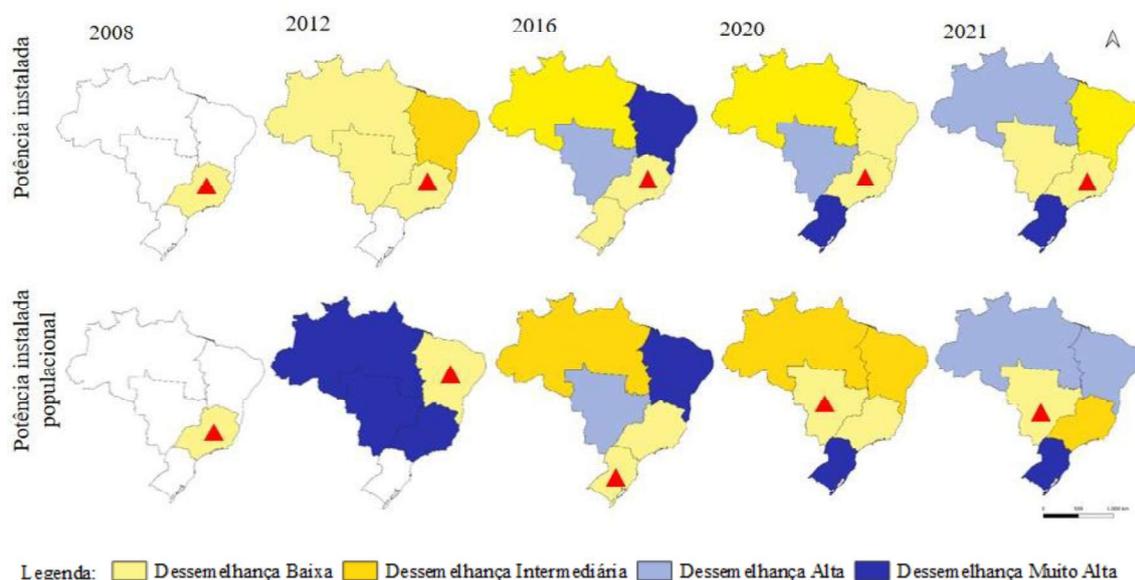
brasileiros. Esse cenário pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo o alto custo da energia elétrica convencional e sua instabilidade, vista no apagão de 2020 no estado do Amapá, que afetou 13 dos 16 municípios, incluindo a capital, e se estendeu por 22 dias. Esse evento pode ter refletido sobre a necessidade de fontes de energia mais confiáveis e autossuficientes. Em 2014, houve uma significativa concentração (0,41), principalmente devido ao crescimento dos sistemas de minigeração na região Nordeste do país. Este aumento foi impulsionado pelo estado de Pernambuco, que se destacou pela sua elevada potência instalada, aproximadamente 1,3 MW, concentrada na cidade de São Lourenço da Mata-PE, que, em 2013, instalou a primeira usina solar na Arena Pernambuco, em preparação para a Copa de 2014 (ESPN, 2014).

Na perspectiva estadual, foi observado que os índices são consistentemente mais elevados em relação aos valores regionais, o que é um cenário esperado. O pico do índice, indicando a maior concentração da potência instalada, ocorreu em 2012 (0,48), representando uma situação mais próxima de um monopólio, concentrado na Bahia. Esta alta concentração na Bahia foi reflexo da inauguração do primeiro estádio da América Latina a operar com energia solar, conhecido como “Pituaçu Solar”, localizado em Salvador - BA (SUPERINTENDÊNCIA DOS DESPORTOS, 2012). O ano de 2016 (0,17) exibiu o menor índice, refletindo uma distribuição mais ampla da potência instalada.

Observando a potência instalada populacional verificou que as tendências são semelhantes. Em 2021, houve um panorama de maior distribuição (0,2776) pela alta disseminação da tecnologia no país, enquanto em 2012, houve um índice mais alto (0,4814), indicando maior concentração e refletindo o ano pioneiro da tecnologia. Importante ressaltar a relevância de considerar a população, oferecendo maior precisão para compreender a distribuição real da variável no contexto do uso da tecnologia. Na perspectiva das instalações totais, é possível notar uma queda no índice em 2012, por tornar a tecnologia mais bem distribuída em decorrência da Resolução Normativa 482 do mesmo ano. Na análise regional, os menores índices estiveram no último ano analisado, mostrando melhor distribuição no ano em que a tecnologia está mais bem disseminada.

Na Figura 3.4 mostra o índice de dessemelhança de Krugman (SI) nas regiões brasileiras. Para o desenvolvimento do índice foi necessário selecionar as regiões de referência (SI = 0), maior potência instalada e potência populacional. As regiões de referência foram identificadas no mapa com um triângulo vermelho.

Figura 3.4: Evolução do índice de dessemelhança de Krugman (SI) nas regiões brasileiras potência instalada e potência instalada populacional da GD Fotovoltaica para o período de 2008 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

Em 2008, para potência instalada, a região Sudeste foi a única que possuía GD fotovoltaica. No ano de 2012, a região Sudeste continuou sendo referência e as regiões Norte e Centro-Oeste se assemelharam, mas região Nordeste (0,97) apareceu como dessemelhante da referência por ter instalações de minigeração, ao contrário das demais regiões. Embora em alguns anos como 2013 a 2015, a região Nordeste tenha sido referência, mostra apenas o Sudeste como referência.

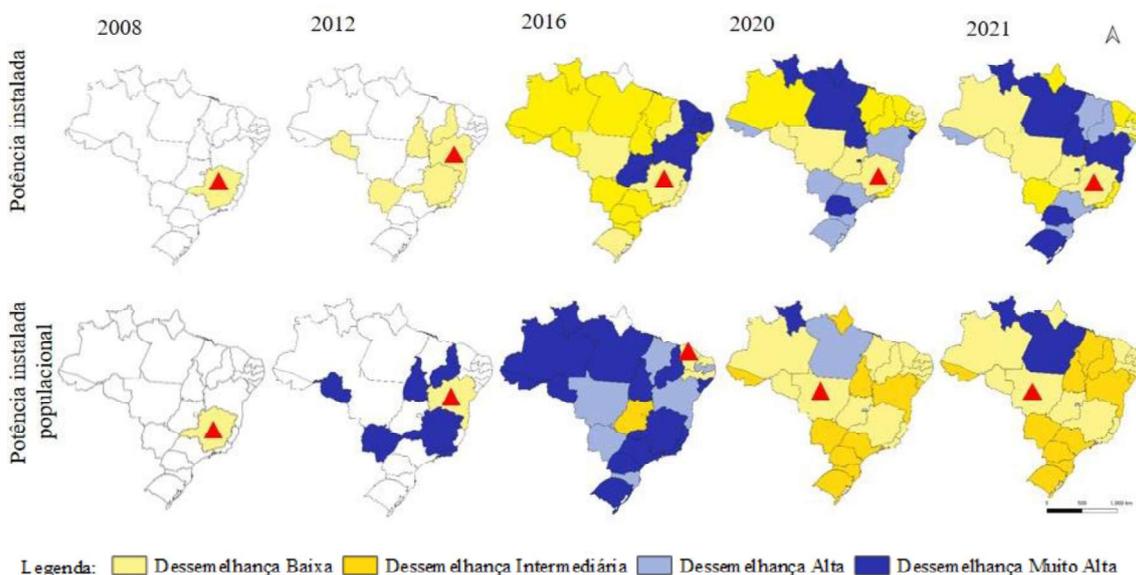
Em 2021, a região Sul demonstrou um índice de Krugman de 0,094, evidenciando uma grande disparidade em relação à região Sudeste. Essa diferença deveu-se à baixa capacidade energética da região Sul em contraste com a alta capacidade da região Sudeste. Nos últimos seis anos, a região que mais se destacou em diferença em relação à região Sudeste foi o Nordeste, particularmente em 2016, com um índice de 0,3201. Isso se deve ao fato de ter sido a única região do país com minigeração regulamentada em 2015 pela Resolução 687, e é interessante notar que, em 2020, foi a mesma região que mais se aproximou da região Sudeste, com um índice de 0,0103.

Ao analisar o SI para a potência instalada populacional, em 2008, os mapas foram semelhantes pela tecnologia existir apenas na região Sudeste. Em 2012, todas as regiões com instalações apresentaram diferenças em relação à referência, o que refletiu a baixa

potência instalada populacional nas demais regiões do país. Em 2016, a região Sul foi utilizada como referência e o Nordeste foi a região menos semelhante, com um índice de similaridade de 0,31, enquanto o Sudeste foi o mais semelhante, com um índice de 0,013. Já em 2020 e 2021, o Sul foi a região que menos se assemelhou à região de referência, que é o Centro-Oeste. Isso ocorreu devido à baixa população na região Centro-Oeste, que possui aproximadamente 16 milhões de habitantes, enquanto o Sul teve praticamente o dobro, com 30 milhões de habitantes e a diferença na potência instalada não foi tão significativa, sendo de 2,5 GW para o Sul e 1,5 GW para o Centro-Oeste.

Na Figura 3.5 é mostrada a evolução do índice de dessemelhança de Krugman para os estados. Para a análise de potência instalada, em 2008 foi análogo às regiões, pois tinha apenas o estado de Minas Gerais. Minas Gerais foi o estado de referência até 2011 e os índices de todos os estados são nulos, o que mostra que se assemelham à potência instalada em Minas Gerais.

Figura 3.5: Evolução do índice de dessemelhança de Krugman (SI) da GD fotovoltaica nos estados brasileiros da potência instalada e potência instalada populacional para o período de 2008 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

Em 2012, os índices seguem nulos, mas a região de referência é a Bahia. Nos anos de 2016 a 2021, Minas Gerais foi o estado de referência. Em 2016, o estado que mais diferiu da referência foi Pernambuco com índice de 0,457, isso ocorreu pela baixa

potência de Pernambuco nas instalações de microgeração. No ano de 2020 e 2021, o estado que mais diferiu da referência foi Roraima com índice de 0,48 e 0,33, respectivamente. Os Estados do Amapá e Roraima diferiram da região de referência por sua baixa potência instalada. Com o passar dos anos foi possível observar o mapa com a mistura de cores, em consequência à popularização e desigualdade da quantidade de potência instalada da tecnologia em todos os estados brasileiros, mostrando divergência regional, quanto as estruturas setoriais, assim como observado por Goschin et al. (2009).

A análise da potência instalada populacional revelou que em 2012, a Bahia se destacou como referência devido à sua alta potência instalada e baixa população em comparação aos demais estados. Nesse ano, todos os estados que possuíam instalações apresentaram uma alta dissimilaridade, com índices de Krugman iguais a 1. Já em 2016, o Ceará assumiu o papel de referência, enquanto os estados mais semelhantes foram Pernambuco e Rio Grande do Norte, com índices de 0,015 e 0,064, respectivamente. Isso ocorreu, pois a população desses estados era similar.

Em 2020 e 2021, Mato Grosso tornou-se a referência, e os demais estados não apresentaram uma alta divergência, uma vez que a potência instalada se mostrou proporcional à população de cada estado, tornando-os comparáveis entre si, com exceção de Roraima e Pará que se apresentaram dessemelhantes. Sendo assim, a evolução temporal da potência instalada populacional indica um índice de Krugman mais baixo, pois quanto mais os estado estão envolvidos no processo de integração do uso da tecnologia, menos diferem de suas referências, como foi visto por Longhi et al. (2014).

3.4 CONCLUSÃO

O trabalho fez uma análise regional da potência instalada da GD fotovoltaica no Brasil, de 2008 a 2021, para incentivar o cumprimento do sétimo objetivo da ODS. O emprego da tecnologia fotovoltaica no Brasil seguiu uma trajetória exponencial, com grande salto em 2020, indo de 2,19 MW para 5,14 MW. Isto foi reflexo da escassez hídrica e a nova bandeira tarifária criada pela ANEEL. Minas Gerais apareceu como destaque em potência instalada e potência instalada populacional por ter sido o estado pioneiro no uso da tecnologia no Brasil, mostrando-se com alto valor em todos os cenários analisados.

Foi visto que os destaques percentuais da potência instalada e potência instalada populacional foram semelhantes, pois a população só influenciou quando se considerou

os índices de forma individual em cada região como forma de tornar as variáveis, de cada região, comparativas entre si.

O índice de Hoover mostrou maior concentração de tecnologia na análise estadual, pois quando se tratou os estados juntos, a análise regional tornou-se distribuída. Este índice mostrou o aumento da distribuição da tecnologia no país com o passar dos anos, pois nos anos iniciais eram concentrados em alguns estados como em Minas Gerais, para microgeração, e Bahia, para a minigeração.

Na análise de Krugman, foi possível perceber o destaque da região Sudeste e o estado de Minas Gerais como referência para a potência instalada. Por outro lado, na análise da potência instalada populacional, não houve um padrão para referência, pois eram regiões atípicas que não tinham alta potência instalada, este destaque foi consequência da baixa população destas regiões. Neste indicador também foi possível notar grande dissimilaridade na potência instalada populacional em 2012.

Por fim, este artigo possibilitou entender a dinâmica regional da GD fotovoltaica no país, mostrando sua disponibilidade, distribuição espacial e organização de mercado. Os resultados mostraram as evidências que contribuem para orientação de política públicas e a tomada de decisão para expansão do setor indicando onde o mercado da geração distribuída fotovoltaica esteve mais aquecido, mostrando localizações otimizadas para novos investimentos. A metodologia apresentada pode ajudar a avaliar a matriz energética do Brasil, assim como de outros países, para fontes renováveis ou combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS

- ABDELKADER, Salim Bourchid; HAMIDOUCHE, M.'hamed. Concentration of Economic Activities in the Kingdom of Saudi Arabia. **European Journal of Interdisciplinary Studies**, v. 12, n. 1, p. 15-40, 2020.
- ADAMIAK, C., SZYDA, B., DUBOWNIK, A., & GARCÍA-ÁLVAREZ, D. Airbnb Offer in Spain—Spatial Analysis of the Pattern and Determinants of Its Distribution. **International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 3, p. 155, 2019.
- AGRAWAL, N.; KAPOOR, A.; GUPTA, M. Monthly energy yield assessment of solar photovoltaic system under uniform irradiance and partial shaded condition. **Materials Today: Proceedings**, 2022.
- AL-DOUSARI, A., AL-NASSAR, W., AL-HEMOUD, A., ALSALEH, A., RAMADAN, A., AL-DOUSARI, N., & AHMED, M. Solar and wind energy: Challenges and solutions in desert regions. **Energy**, v. 176, p. 184-194, 2019.

ALI, G. G., EL-ADAWAY, I. H., SIMS, C., HOLLADAY, J. S., & CHEN, C. F. Policies and incentives for promoting distributed solar generation: Impact on electric power infrastructure. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 28, n. 4, p. 04022034, 2022.

BUSU, M. A market concentration analysis of the biomass sector in Romania. **Resources**, v. 9, n. 6, 2020.

CHIRAMBO, Dumisani. Addressing the renewable energy financing gap in Africa to promote universal energy access: Integrated renewable energy financing in Malawi. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 793-803, 2016.

COELHO JUNIOR, L. M. Concentração regional do valor bruto de produção do pinhão no Paraná. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v.26, n.3, p.853-861, jul/set 2016.

COELHO JUNIOR, L. M.; SANTOS JÚNIOR, E. P. Space-time conglomerates analysis of the forest-based power plants in Brazil (2000–2019). **Energies**, v. 15, n. 11, p. 4113, 2022.

COSTA, E., TEIXEIRA, A. C. R., COSTA, S. C. S., & CONSONI, F. L. Influence of public policies on the diffusion of wind and solar PV sources in Brazil and the possible effects of COVID-19. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, p. 112449, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. DISPONÍVEL em: <<https://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em: 25 out. 2022.

ESPN. ARENA PERNAMBUCO TERÁ USINA SOLAR PARA COPA DE 2014. Disponível em: http://www.espn.com.br/noticia/278262_arena-pernambuco-tera-usina-solar-para-copa-de-2014. Acesso em: 07 fev. 2024.

FLORIDA, R.; ADLER, P. Economic Geography. Em: KOBAYASHI, A. (Ed.). **International Encyclopedia of Human Geography** (Second Edition). Oxford: Elsevier, 2020. p. 25–28.

GASPAR, José M. New economic geography: history and debate. **The European Journal of the History of Economic Thought**, v. 28, n. 1, p. 46-82, 2021.

Geração Distribuída. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 31 out. 2022.

GHAZOUANI, T. Dynamic impact of globalization on renewable energy consumption: Non-parametric modelling evidence. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 185, p. 122115, 1 dez. 2022.

GEBARA, C. H.; LAURENT, A. National SDG-7 performance assessment to support achieving sustainable energy for all within planetary limits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 112934, 2023.

GIELEN, D., BOSHELL, F., SAYGIN, D., BAZILIAN, M. D., WAGNER, N., & GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, 1 abr. 2019.

GOSCHIN, Z., CONSTANTIN, D. L., ROMAN, M., & ILEANU, B. Specialisation and Concentration Patterns in the Romanian Economy. **MPRA Paper**. Disponível em: <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/88832/>>. Acesso em: 31 out. 2022.

HOSSAIN, M. K.; MENG, Q. A thematic mapping method to assess and analyze potential urban hazards and risks caused by flooding. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 79, p. 101417, 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-power-generation-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

KAN, A., ZENG, Y., MENG, X., WANG, D., XINA, J., YANG, X., & TESREN, L. The linkage between renewable energy potential and sustainable development: Understanding solar energy variability and photovoltaic power potential in Tibet, China. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101551, 1 dez. 2021.

KABALCI, E; BOYAR, A; KABALCI, Y. Centralized power generation. In: Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids. **Academic Press**, 2021. p. 47-72.

LONG, L; NUCCI, A. The Hoover index of population concentration: A correction and update. **The Professional Geographer**, v. 49, n. 4, p. 431-440, 1997.

LONGHI, C; MUSOLESI, A; BAUMONT, C. Modeling structural change in the European metropolitan areas during the process of economic integration. **Economic Modelling**, v. 37, p. 395-407, 2014.

MALECKI, E. J. Economic Geography. Em: WRIGHT, J. D. (Ed.). **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences** (Second Edition). Oxford: Elsevier, 2015. p. 33-37.

MEHIGAN, L., DEANE, J. P., GALLACHÓIR, B. Ó., & BERTSCH, V. A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems. **Energy**, v. 163, p. 822-836, 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados e estatística. 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx>. Acesso em: 25 jan. 2023;

POSSAS, M. L. Estruturas de mercado em oligopólio: economia e planejamento. 2. ed. São Paulo: Hucitec, 1999. 191p.

Relação de empreendimentos de Geração Distribuída - Dados Abertos - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empresendimentos-de-geracao-distribuida>. Acesso em: 28 out. 2022.

RANI, P; PARKASH, V; SHARMA, N.K. Technological aspects, utilization and impact on power system for distributed generation: A comprehensive survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 192, p. 114257, 2024.

SANTOS JÚNIOR, E. P., DA SILVA, M. V. B., SIMIONI, F. J., ROTELLA JUNIOR, P., MENEZES, R. S. C., & COELHO JUNIOR, L. M. Location and concentration of the forest bioelectricity supply in Brazil: A space-time analysis. **Renewable Energy**, v. 199, p. 710-719, 1 nov. 2022.

SINIČÁKOVÁ, Marianna; ŠTIBLÁROVÁ, Ľubica. Regional Aspects of Business Cycle Synchronization in the V4 Countries. **Editorial Board**, v. 11, n. 2, p. 40, 2016.

SHRESTHA, A. et al. Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. **Renewable Energy**, v. 199, p. 419–432, 1 nov. 2022.

SUPERINTENDÊNCIA DOS DESPORTOS DO ESTADO DA BAHIA - SUDESB. Política Pública. Disponível em: <http://www.sudesb.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=18>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2024.

STEEVES, G. M.; PETTERINI, F. C.; MOURA, G. V. The interiorization of Brazilian violence, policing, and economic growth. **Economia**, v. 16, n. 3, p. 359–375, 2015.

TAKAHASHI, T. On the economic geography of an aging society. **Regional Science and Urban Economics**, v. 95, p. 103798, 1 jul. 2022.

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. 2015. Disponível em: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E. Acesso em: 01 mar. 2023.

4 ARTIGO 3 – DISPARIDADES REGIONAIS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA, BRASIL

RESUMO

Este artigo analisou a disparidade regional da Geração Distribuída - GD fotovoltaica na Paraíba, observando os efeitos locais e de especialização. As informações da potência instalada, em quilowatts (kW), dos recortes geopolíticos da Paraíba são oriundas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os dados disponíveis se distribuem em grupos de alta (A1, A2, A3, AS) e baixa (B1, B2, B3 e B4) tensão, no período de 2014 a 2021. Para mensurar a concentração local e de especialização utilizou-se os seguintes indicadores: quociente de localização (QL), índice de Hoover (H), índice de dessemelhança de Krugman (SI) e índice de Ellison-Glaeser (EG). Os principais resultados indicaram um incremento contínuo na capacidade instalada de geração distribuída fotovoltaica no estado da Paraíba, apresentando um aumento de aproximadamente 200% a.a. no período compreendido entre 2014 e 2016. O QL inferiu destaque para os grupos B1, B2 e B3 por serem populares em todo estado e o grupo B1 de João Pessoa se sobressaiu por apresentar alta especialização produtiva com QL de 3,53. O SI mostrou que as referências do uso da tecnologia são regiões similares às determinadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE). O H tem valor igual a 0,723, no grupo B1, indicando proximidade do monopólio nas cidades de Patos e Cabaceiras em 2021. O EG eliminou os fatores de aglomeração natural e mostrou a tendência econômica de crescimento, com o grupo B1 com maior quantidade de valores negativos por não se aglomerar em uma região, em decorrência das forças desaglomerativas. Conclui-se que estas evidências desempenham um papel importante na orientação das políticas públicas e na tomada de decisões para avaliar o portfólio da matriz elétrica e/ou energética de outras regiões.

Palavras-Chave: Energia limpa, Economia da energia, Economia regional.

ARTICLE 3 – REGIONAL DISPARITIES IN DISTRIBUTED GENERATION OF PHOTOVOLTAIC ENERGY IN PARAÍBA, BRAZIL

ABSTRACT

This article analyzed the regional disparity of Distributed Generation - photovoltaic DG in Paraíba, observing locational and specialization effects. The information on the installed power, in kilowatts (kW), of the geopolitical areas of Paraíba comes from the National Electric Energy Agency (ANEEL). The available data is distributed into groups of high (A1, A2, A3, AS) and low (B1, B2, B3, and B4) tension, in the period from 2014 to 2021. To measure locational concentration and specialization, the following indicators were used: location quotient (QL), Hoover index (H), Krugman dissimilarity index (SI), and Ellison-Glaeser index (EG). The main results indicated a continuous increase in the installed capacity of distributed photovoltaic generation in the state of Paraíba, showing an increase of approximately 200% p.a. in the period between 2014 and 2016. The QL highlighted groups B1, B2, and B3 as they were popular throughout the state, and group B1 in João Pessoa stood out for presenting high productive specialization with a QL of 3.53. The SI showed that the references for the use of technology are regions similar to those determined by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). H has a value equal to 0.723, in group B1, indicating proximity to the monopoly in the cities of Patos and Cabaceiras in 2021. EG eliminated natural agglomeration factors and showed the economic growth trend, with group B1 with a greater number of negative values for not agglomerating in a region, due to deagglomerative forces. It is concluded that this evidence plays an important role in guiding public policies and in decision-making to evaluate the electrical and/or energy matrix portfolio of other regions.

Keywords: Clean energy, Energy economics, Regional economy.

4.1 INTRODUÇÃO

A energia solar corresponde à energia proveniente da radiação do Sol, sob forma de calor (térmica) ou eletricidade (fotovoltaica). É uma fonte de energia infinita e renovável, considerada sustentável por não emitir gases de efeito estufa, capaz de auxiliar o processo de descarbonização da economia e atender aos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) para 2030. Dentre os principais, exerce influência sobre: ODS 7, assegurando o acesso a recursos energéticos confiáveis e sustentáveis; ODS 12, enfatizando a promoção de padrões de produção e consumo sustentáveis; ODS 13, concentrando na ação climática (GAUTAM et al., 2021; LAIMON et al., 2022; MATHUR et al., 2020; NASTASE et al., 2018; SAIDANI et al., 2019; VAN et al., 2023).

A geração de energia fotovoltaica tem chamado atenção dos países que buscam reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os efeitos negativos relacionados às mudanças climáticas. Este setor é visto como um dos mais promissores das energias renováveis e encontra-se em expansão de acelerada, tornando-o competitivo em mercado global, em especial na Comunidade Europeia, China e Estados Unidos. No Brasil, a energia solar fotovoltaica divide-se em geração centralizada e distribuída, sua expansão foi observada a partir do século XXI, após sua inserção na matriz elétrica e o início de leilões para esta fonte (SAMPAIO; GONZALEZ, 2017). Em 2008, Minas Gerais foi o estado pioneiro em Geração Distribuída - GD fotovoltaica, com uma capacidade instalada de 25 kW. Em 2012, estabeleceu condições gerais para o acesso da minigeração e microgeração com a Resolução nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em 2015, permitiu a geração compartilhada, validade de créditos por 60 meses e aumento da minigeração para 5 MW para unidades de GD, com a Resolução nº 687 da ANEEL.

De acordo com a ANEEL (2022), em 2021 a GD fotovoltaica no Brasil teve uma capacidade instalada 9,84 GW, distribuídos em todo território nacional (5.460 municípios). Os principais estados de GD, em capacidade instalada, foram Minas Gerais (1.476 MW), São Paulo (1.063 MW) e Rio Grande do Sul (1.009 MW). Na região Nordeste que deteve 18,39% da GD brasileira, sendo os 3 primeiros Bahia (363 MW), Ceará (316 MW) e Pernambuco (275 MW). A Paraíba esteve na sétima posição no Nordeste e 18ª no Brasil, com capacidade de 162,07 MW, gerados em 12.845 unidades e distribuídos em 217 municípios.

A distribuição da GD fotovoltaica não é espacialmente uniforme nos municípios, refletindo uma dinâmica regional com influência econômica e geográfica. Algumas

regiões concentram capacidade instalada, enquanto em outras são dispersas, compatibilizando com as teorias de economia regional. Este ramo da economia se concentra no estudo de atividades econômicas de uma área, examinando interações de diferentes regiões e como afeta no desenvolvimento do setor analisado (WANG et al., 2022). Os aspectos regionais analisados têm influência das condições edafoclimáticas, infraestrutura, aptidão à adoção tecnológica, etc. Para entender estas disparidades, guiam-se estudos a respeito da concentração e especialização destas atividades econômicas, para o fornecimento de informações relevantes à tomada de decisão e orientação às políticas públicas (CHARUMBIRA; SUNDE, 2010; COMMENDATORE et al., 2022; MATTEI, 2018;).

As investigações que abordaram esta temática estão em Dixon e Freebairn (2007) que exploraram o desemprego na Austrália para entender os efeitos dos ciclos econômicos e das mudanças estruturais; Goschin et al. (2009) analisaram os padrões de especialização e concentração na economia romena; Lasagni et al. (2007) estudaram os determinantes de localização e especialização de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) na Itália; Wazzan (2017) analisou a distribuição espacial das escolas de educação básica na cidade de Lattakia na Síria; Araújo et al. (2017) compreenderam a distribuição espacial das indústrias do Nordeste e identificaram uma desconcentração da indústria de transformação, com tendência para dispersão dos setores com baixa tecnologia.

Alguns estudos se dedicaram ao setor energético como Santos Júnior et al. (2022) que avaliaram a localização e concentração da bioeletricidade florestal no Brasil e identificaram que a maior oferta está associada indústria celulose e papel; Coelho Junior et al. (2020) analisaram o Valor Bruto da Produção dos produtos madeireiros nativos da Paraíba para promoção do extrativismo vegetal de maneira sustentável, visando atender à demanda energética local. Martins et al. (2018) compreenderam a disparidade da produção do extrativismo vegetal entre o Nordeste e o Brasil e a lenha foi predominante. Estes ensaios se concentraram em bioenergia, mostrando que há uma carência de estudos que abordem os aspectos econômicos regionais na GD fotovoltaica.

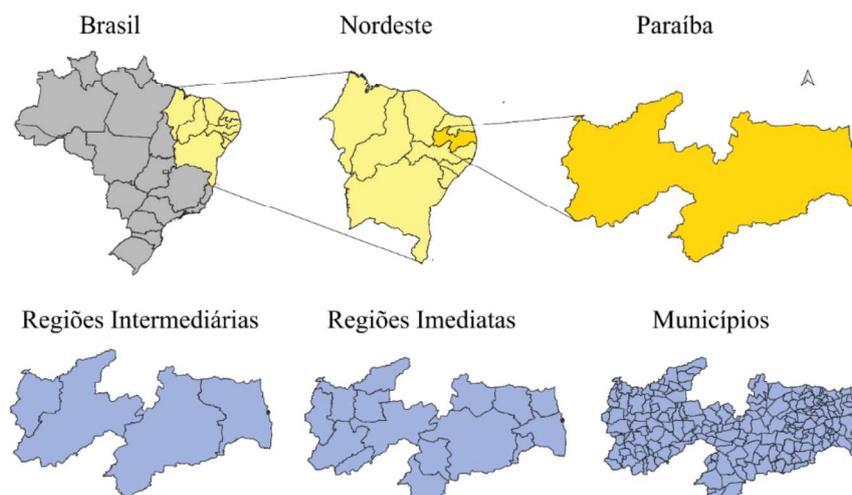
Observar a dispersão regional da GD fotovoltaica por meio da utilização de indicadores de concentração são importantes para determinação da estrutura de mercado, considerando a predominância de um segmento econômico em um recorte regional. Diante da lacuna existente na literatura, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para análise da disparidade regional da Geração Distribuída - GD fotovoltaica na Paraíba, observando os efeitos locais e de especialização, de 2014 a

2021. Este estudo auxiliará na compreensão da evolução do uso da tecnologia fotovoltaica na Paraíba e entendimento da configuração do mercado. Os resultados contribuirão para subsidiar políticas públicas, investimentos no setor e avaliar o portfólio da matriz elétrica e/ou energética de outras regiões.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A região de estudo foi determinada pelos recortes geográficos da divisão territorial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) que dividiu a área analisada em municípios, regiões intermediárias e regiões imediatas da Paraíba, de acordo com a Figura 4.1. As unidades geradoras fotovoltaicas por radiação solar na Paraíba estavam disponíveis na Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração (SCG/ANEEL), no período de 2014 e 2021, referindo-se aos micro e minigeradores distribuídos, abrangidos pela Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL. Os dados foram fornecidos como potência instalada, em quilowatt (kW), e agrupados nos recortes regionais: municípios, regiões imediatas e regiões intermediárias.

Figura 4.1. Localização do estado da Paraíba e divisões territoriais.



Fonte: IBGE (2022).

4.2.1 Medidas locacionais e de concentração da economia espacial

As medidas locacionais utilizadas foram: quociente locacional (QL), índice de Hoover (H), índice de dessemelhança de Krugman (SI) e índice de Ellison-Glaeser (EG).

O quociente locacional (QL) compara a contribuição do grupo de tensão nas instalações das unidades geradoras em uma região específica com a participação desse mesmo grupo em uma região de referência, neste caso, o estado da Paraíba. Ele evidencia a localização relativa das potências ativas instaladas em diferentes regiões, permitindo a avaliação da competitividade entre elas. Ao longo do tempo, essa análise oferece *insights* sobre as tendências de crescimento ou declínio da potência instalada em cada área geográfica (YU; LIU, 2021). Este indicador é expresso pela Equação 4.2.

$$QL_{ij} = \frac{E_{ij}/E_i}{E_j/E} \quad (4.2)$$

onde, E_{ij} é a potência instalada no grupo de tensão i na região j ; E_j é a potência instalada em todos os grupos de tensão na região; E_i é a potência do grupo de tensão i na região de referência; E é a potência instalada em todos os grupos de tensão na região de referência. O QL é classificado como: não especializada ($QL < 0,5$), especialização fraca ($0,5 \leq QL < 1$), distribuição produtiva ($1 \leq QL < 3$) e especialização produtiva ($QL \geq 3$) (PIACENTI et al., 2008).

O índice de Hoover (H), mostrado na Equação 4.3, foi utilizado para medir a concentração da GD fotovoltaica nos recortes regionais e entender a influência dos tipos dos grupos de tensão para a potência total do estado da Paraíba. Esta ferramenta permite analisar a distribuição da potência instalada, fornecendo percepções sobre desigualdades na distribuição da potência instalada da Paraíba (VAN DEN BRAKEL; LOK, 2021).

$$H = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left| p_i - \frac{1}{n} \right| \quad (4.3)$$

em que, p_{it} é a participação da potência instalada de GD fotovoltaica, i é a região observada, n é a quantidade de regiões participantes. O índice de Hoover varia de 0 a 1. Sendo 0 baixa concentração com distribuição uniforme e 1, alta concentração com monopólio (HUANG; LEUNG, 2009; WENG, 1998;).

O Índice de Dessemelhança de Krugman (SI), conforme definido pela Equação 4.4, é uma medida que compara uma mesma variável em duas regiões distintas de mesma ordem, utilizando uma delas como referência para avaliar o quanto elas diferem entre si. Neste contexto, a região com a maior potência instalada foi selecionada como referência. A aplicação deste índice é particularmente relevante ao considerar a integração energética entre diferentes regiões e municípios dentro do estado, pois proporciona uma visão clara das disparidades em relação ao melhor caso, destacando a necessidade de ajustes e

investimentos para garantir a compatibilidade entre os sistemas (MILETIC, 2022). O índice foi calculado ano a ano e, posteriormente, calculou-se a média de 2014 a 2017, 2018 a 2021 e 2014 a 2021.

$$SI_{ij} = \sum_k \left| \frac{E_{ki}}{E_i} - \frac{E_{kj}}{E_j} \right| \quad (4.4)$$

em que, E_{ki} é a capacidade instalada, em kW, do grupo tensão k no local i; E_i é a capacidade instalada total no local i; E_{kj} é a capacidade instalada do grupo tensão k da referência j; E_j é a capacidade instalada total da referência j; e k são os grupos de tensão. O SI varia de 0 a 2, sendo igual a zero, a estrutura que se assemelha à referência. Quanto mais aumenta, mais se distancia da referência.

O índice de Ellison-Glaeser, mostrado na Equação 4.5, propõe quantificar a concentração de uma atividade econômica. Este índice reduz e corrige a limitação dos índices de concentração tradicionais que poderiam causar uma ilusão de concentração espacial. De acordo com Cassey et al. (2014), o índice estudado é a combinação do índice de Hirshman-Herfindahl (HHI), equação 4.6, com Gini (G), equação 4.7.

$$EG_k = \frac{G - (1 - \sum_i x_i^2) HHI}{(1 - \sum_i x_i^2)(1 - HHI)} \quad (4.5)$$

$$HHI = \sum_{i=1}^M \left(\frac{E_{ki}}{E} \right)^2 \quad (4.6)$$

$$G = \sum_{i=1}^M \left(\frac{E_{ki}}{E_k} - \frac{E_i}{E} \right)^2 \quad (4.7)$$

em que, HHI é o somatório da potência instalada do tipo k na região i (E_{ki}), em razão do total de potência instalada (E) no recorte analisado elevado ao quadrado, enquanto o G é o somatório da diferença entre as potências do tipo k na região i e a parcela de instalações na região total. O índice EG_k igual a 0 quando não há vantagens naturais; já com valores positivos quando as unidades estão espacialmente próximas e há tendência para aglomeração, e; para valores negativos ocorrem uma desconcentração espacial por influência desaglomerativa (RESENDE; WYLLIE, 2005).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4.1 mostra a evolução da capacidade instalada da GD fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021, para as regiões intermediárias do Estado. Os sistemas fotovoltaicos distribuídos chegaram à Paraíba em 2014 com capacidade de 0,0159 MW, nas regiões intermediárias de João Pessoa (60,93%) e de Patos (39,07%). No ano seguinte,

a Paraíba teve capacidade instalada de 0,0388 MW, em todas as suas regiões intermediárias. O crescimento do uso dos sistemas solares no estado em 2016, comparando com o primeiro ano de instalação foi de quase 200% a.a., em decorrência da Resolução Normativa nº 687/ 2015 da ANEEL que criou os sistemas de compensação de créditos e aumentou o limite superior dos sistemas de minigeração.

Tabela 4.8 - Potência instalada acumulada (MW) das unidades geradoras nas regiões intermediárias da Paraíba, de 2014 a 2021.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
João Pessoa	0,0097	0,0152	0,2516	0,7214	1,74	8,55	27,25	57,18
Campina Grande	0,0000	0,0034	0,0482	0,3268	2,10	8,35	15,48	30,61
Patos	0,0062	0,0187	0,0601	0,2905	2,89	10,95	25,20	46,83
Sousa-Cajazeiras	0,0000	0,0015	0,0590	0,7850	4,53	11,14	20,61	29,08
Paraíba	0,0159	0,0388	0,4188	2,1238	11,25	38,99	88,53	163,70

Fonte: ANEEL (2022).

Em 2018, a Paraíba apresentou um crescimento na capacidade instalada da GD fotovoltaica, atingindo a marca de 11,25 MW, o que representou um incremento de 130% em comparação a 2017. A região intermediária de Patos destacou-se das demais com um crescimento de 215% entre 2017 e 2019 (variando de 0,29 MW para 2,89 MW) nesse setor. Entre 2018 e 2020, a capacidade instalada aumentou atingindo a 88,53 MW em todo o estado. A região intermediária de João Pessoa sobressaiu-se com um incremento de 150% a.a., saindo de 1,74 MW e atingindo 27,25 MW. O alto desenvolvimento do uso da GD fotovoltaica neste período foi reflexo do elevado valor da energia elétrica como consequência da “bandeira roxa”, nova bandeira tarifária que transformava 100 kWh que era R\$ 9,49 para R\$ 14,20, em decorrência da escassez hídrica.

Entre 2020 e 2021, houve um crescimento menos expressivo na capacidade instalada, variando de 88,53 MW para 163,7 MW, apresentando um aumento de 36%. A região de Sousa-Cajazeiras evidenciou o menor crescimento, atingindo 18,80% (variando de 20,61 MW para 29,08 MW), enquanto as demais regiões registraram um crescimento próximo a 40%. Isto aconteceu devido ao período da pandemia da COVID-19 que prejudicou a instalação de novos sistemas por causa do *lockdown*, reduzindo as atividades comerciais (CAI; GOU, 2024).

Notou o alto desenvolvimento da potência instalada nas regiões do litoral (João Pessoa) e semiárido (Patos) como reflexo do pioneirismo no estado. Além disso, a região intermediária de João Pessoa foi a porta de entrada para as tecnologias no estado, por ter

a capital e primeira cidade a possuir instalação fotovoltaica na Paraíba, João Pessoa. Já no semiárido, a alta potência instalada foi reflexo do alto potencial energético da região, em decorrência dos altos índices anuais de irradiação solar, e baixo custo da terra nesta região do Brasil que se conectou à viabilidade econômica do empreendimento (CUNHA; PONTES, 2022).

O crescimento observado ao longo desses anos no estado foi fomentado por subsídios e políticas regulatórias favoráveis. Além disso, a busca por alternativas viáveis em face do alto custo da energia foi um fator preponderante, assim como a redução da dependência ao sistema elétrico, impulsionando a adoção da energia solar fotovoltaica para assegurar o acesso à energia a preços mais acessíveis e segurança energética. (LEE; SHEPLEY, 2020).

A Tabela 4.2 apresenta a evolução da potência instalada fotovoltaica por grupos de tensão das unidades geradoras da Paraíba, em megawatts (MW), de 2014 a 2021. Em 2014, as instalações existentes consistiam exclusivamente dos grupos de tensão B1 com 0,013 kW (85%) e B3 com 0,0023 kW (15%). No ano subsequente, houve a adição do grupo B2, contribuindo com 1,5 kW (4%), acompanhado pelos grupos B1, com 0,019 kW (49%), e B3, com 0,018 kW (47%). Em 2016, registrou-se a inclusão do grupo A4, com capacidade de 0,082 kW, o que representava 20% da capacidade instalada naquele período. Em 2019, o grupo B4, com capacidade de 50 kW, juntou-se aos grupos de tensão A4, B1, B2 e B3. No ano seguinte, o grupo A1 foi introduzido na Paraíba, somando 0,112 MW à potência total instalada. Finalmente, em 2021, observou-se a inserção dos grupos AS, com 0,005 MW, e A3, com 0,104 MW, na estrutura de grupos de tensão da região.

Tabela 4.9 Evolução da potência instalada fotovoltaica por grupos de tensão (MW) das unidades geradoras na Paraíba, de 2014 a 2021.

GT	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A1							0,112	0,627
A3								0,104
A4			0,082	0,180	1,003	4,53	15,11	27,94
AS								0,005
B1	0,014	0,019	0,170	0,829	4,50	16,49	33,58	67,67
B2		0,002	0,010	0,108	0,73	2,07	4,58	9,70
B3	0,002	0,018	0,157	1,008	5,02	15,85	35,15	57,66
B4						0,05	0,05	0,05
Paraíba	0,016	0,039	0,419	2,124	11,25	38,99	88,58	163,75

Fonte: ANEEL (2022).

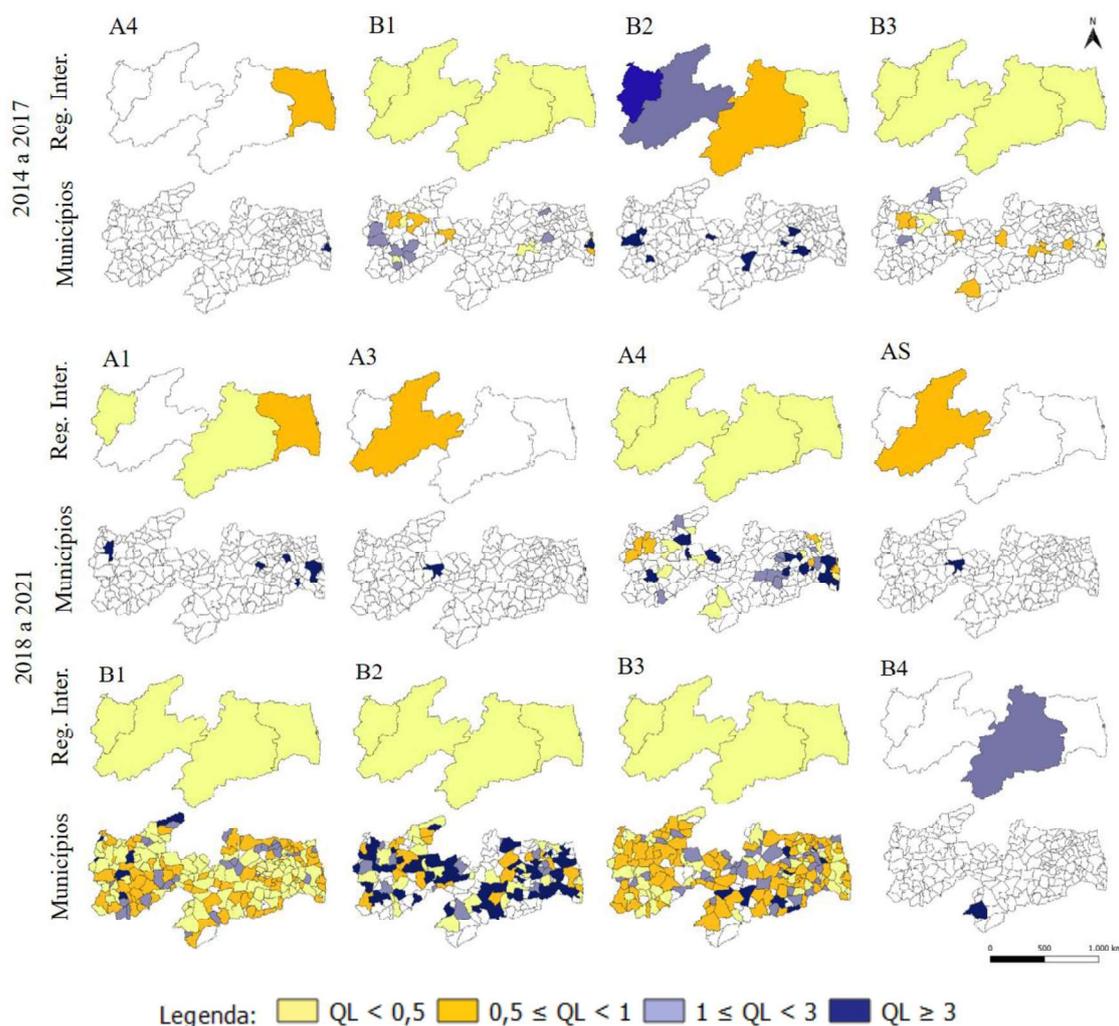
Em todos os anos analisados, os grupos B1 e B3 tiveram maior potência instalada, pode ser consequência da alta demanda de mercado. Além disso, o grupo B1 foi o mais comum por ser referente às instalações residenciais que engloba 9.436 (73%) das 12.843 unidades geradoras. O grupo B3, apesar de só possuir 2.649 (20%) unidades geradoras, teve alta potência instalada por envolver grupo com alta potência para suprir sua demanda energética como industrial, comercial, poder público, serviço público. A crescente adoção da tecnologia no estado pôde estar diretamente relacionada ao início do estímulo à GD fotovoltaica na Paraíba, que teve início em 2015 por meio de incentivos fiscais. Os Convênios (101/97 e 16/2015) estabelecidos pelo Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) desencadearam a isenção do imposto do ICMS sobre equipamentos elétricos específicos para instalação dos sistemas fotovoltaicos (CONFAZ, 1997; CONFAZ, 2015).

A Figura 4.3 ilustra a evolução do Quociente Locacional (QL) da potência instalada da GD fotovoltaica na Paraíba, considerando municípios e suas regiões intermediárias, com valores médios referentes aos anos de 2014 a 2017 e de 2018 a 2021. Nos primeiros anos, destacou a presença do grupo de tensão A4 exclusivamente em João Pessoa, com um nível muito alto de QL (6,85) na análise municipal, refletindo elevada concentração do grupo. Contudo, na análise regional, o índice se apresentou em um patamar médio (2,30). Notou concentração das atividades produtivas nos grupos B1, B2 e B3 em toda a extensão do estado. O grupo B1 demonstrou uma presença em 18 municípios paraibanos, abrangendo todas as regiões intermediárias do estado. A capital, João Pessoa, foi a única cidade a possuir índice muito alto, onde o QL atingiu 3,53, indicando uma especialização produtiva. Tal cenário pode ser justificado pela condição de capital estadual, bem como pela sua posição pioneira na adoção dessa tecnologia específica, além de possuir um mercado mais desenvolvido em comparação com outras áreas. Além disso, observou-se que quatro cidades apresentaram um índice de especialização intermediário, enquanto 13 registraram um índice alto. Por outro lado, as regiões intermediárias apresentaram um QL de nível baixo, sugerindo uma menor especialização (variando entre 0,51 a 1,72) e uma distribuição mais ampla da potência instalada, por possuir as potências menos concentradas por estar considerando a junção de várias cidades.

O grupo de tensão B2 estava presente na zona rural de 9 municípios distribuídos nas quatro regiões intermediárias da Paraíba, onde todas as cidades apresentaram-se com QL muito alto, chegando a atingir o valor de 26,95. Nas regiões intermediárias, a região

de Sousa-Cajazeiras apareceu com QL muito alto (9,22) e Patos mostrou QL de 4,15, seguido da região de Campina Grande, com índice médio (2,46), mostrando uma distribuição produtiva, e a região de João Pessoa com índice baixo (0,07).

Figura 4.2 Evolução dos valores médios do Quociente Locacional (QL) para potência instalada (kW) da Geração Distribuída Fotovoltaica na Paraíba, municípios e regiões intermediárias, de 2014 a 2017 e 2018 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

Observou que o grupo B3 esteve presente em 14 municípios, distribuídos de forma abrangente nas quatro regiões intermediárias do estado. Dessas, duas cidades exibiram Índice de Localização intermediário, enquanto doze alcançaram um índice muito alto, destacando-se Aguiar (2,33) e Catolé do Rocha (2,32). Quanto às regiões intermediárias, todas elas demonstraram um QL em nível baixo, variando de 0,89 a 1,89. Esse contraste

nos valores do índice entre municípios e regiões intermediárias ocorre pois em certos municípios a concentração é significativamente alta e nas regiões intermediárias, a distribuição mostra-se menos centralizada, comparativamente às áreas municipais específicas.

Para os anos de 2018 a 2021, os grupos de alta tensão começaram a se conectar à rede elétrica e os grupos de baixa tensão intensificam-se. O grupo de tensão A1, apresentou instalações em 5 cidades da Paraíba com QL com nível muito alto, por apresentar-se de modo pontual, são elas: São José do Rio do Peixe, Esperança, Guarabira, Pilar e Santa Rita. Este grupo abrangeu 3 regiões intermediárias: Sousa-Cajazeiras (0,94), João Pessoa (2,58) e Campina Grande (0,87). O grupo de tensão A3 apareceu de maneira singular e com alta concentração, por isso tem nível alto (15,98), na cidade de Patos e na região intermediária referente, com QL de nível médio (3,49).

Durante a análise do grupo A4, verificou uma variação considerável nos Índices de Localização (QL) dos municípios, indo desde uma distribuição não especializada até uma especialização produtiva (0,12 a 7,74). As maiores concentrações foram identificadas próximas à costa do estado, em estreita proximidade com o grande centro comercial, João Pessoa, assim como encontrado por Yu e Liu (2021). Notou que cinco cidades apresentaram um índice baixo, enquanto quatro tiveram um índice intermediário. Além disso, dezoito cidades demonstraram um índice alto, enquanto quatorze atingiram um índice muito alto. Essa ampla gama de índices reflete a diversidade na especialização produtiva dos municípios do grupo A4, indicando uma variedade de níveis de desenvolvimento econômico e uso de tecnologia fotovoltaica.

O grupo AS foi inserido na cidade de Patos em 2021 e apresentou QL municipal com nível muito alto de 15,98, já o QL da região intermediária classificou-se com médio contabilizando 3,48, refletindo uma concentração mais alta do que esperada, como mostra Alquhtani (2023). Isto ocorreu pelo grupo de tensão está presente em apenas um município do Estado. O grupo B1 foi o mais frequente, abrangendo 212 municípios. Os índices de Localização (QL) variaram desde 0,01, indicando não especialização, até 77,63, representando alta especialização produtiva. Apenas seis cidades alcançaram o patamar de especialização muito alta: Aguiar, Aparecida, Bernardino Batista, Belém do Brejo do Cruz, Bom Jesus e Boa Ventura. Além disso, viu que 106 cidades se destacaram com um nível alto de especialização produtiva, enquanto 56 apresentaram um nível intermediário e 44 registraram um nível baixo, indicando uma especialização fraca. Nas

regiões intermediárias, por outro lado, observou uma consistência nos níveis baixos de especialização em todas as quatro regiões do estado.

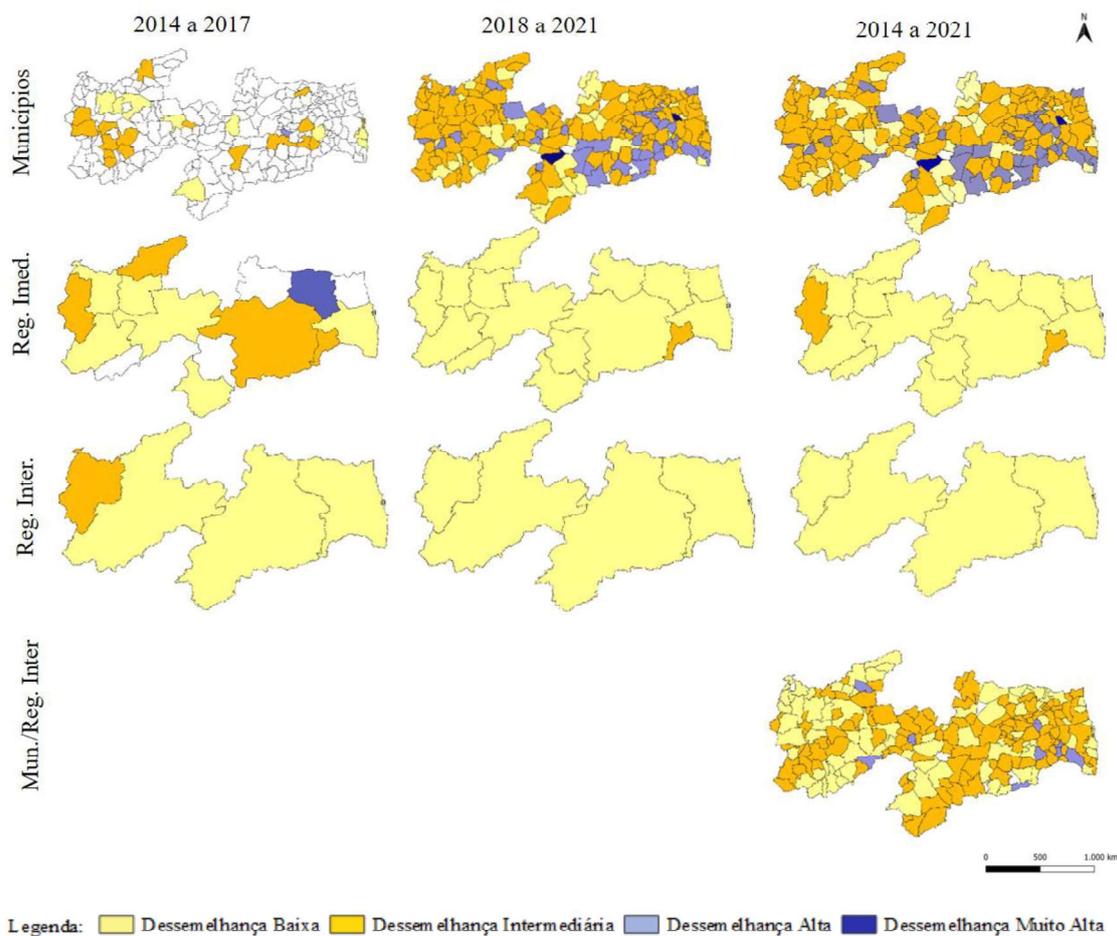
O grupo B2 revelou uma ampla gama de índices de Localização (QL), variando entre 0,05 e 23,54, com predominância de cidades exibindo especialização produtiva. Notou que 70 municípios alcançaram um nível muito alto de especialização, enquanto 33 apresentaram um índice alto, 16 registraram um nível intermediário e 11 demonstraram uma especialização mais fraca. Além disso, vale destacar que as quatro regiões intermediárias da Paraíba exibiram uma especialização relativamente fraca, conforme evidenciado pelo QL. Essa observação ressalta a disparidade entre a especialização produtiva dos municípios e a das regiões intermediárias, indicando uma distribuição heterogênea da atividade econômica no grupo B2.

O grupo B3 abrangeu 189 cidades, apresentando um espectro diversificado de Índices de Localização (QL) que variaram entre 0,11 e 4,01. Esses valores refletiram uma transição de regiões não especializadas para aquelas com um alto nível de especialização produtiva. Neste contexto, nove cidades se destacaram com uma concentração muito alta no uso da tecnologia, enquanto outras 131 exibiram uma concentração alta. Além disso, 35 cidades foram classificadas com uma concentração intermediária, enquanto 13 mostraram uma baixa concentração na utilização desta tecnologia. O QL das regiões intermediárias apresentou-se como não especializadas em todas as regiões que possuem instalação, mostrando maior distribuição da tecnologia por englobar municípios com alta e baixa localização em seu recorte regional. O grupo referente à iluminação pública (B4) teve instalação apenas em 2019 na cidade de Monteiro, tendo QL municipal e da região intermediária apresentando-se como especialização produtiva, concentrado em apenas um município, por ser uma modalidade que está se popularizando. A partir de 2017, na Paraíba, houve permissão concedida pelo Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) para a incorporação de sistemas fotovoltaicos sem a incidência de tributação sobre a injeção na rede e teve como consequência o aumento significativo do número de instalações no estado. Esse fenômeno promoveu uma maior distribuição da tecnologia em diversas regiões, ao passo que possibilitou sua inserção em novas áreas, resultando no incremento da quantidade de municípios com elevado nível de especialização produtiva.

A Figura 4.4 mostra o Índice de Dessemelhança de Krugman para a potência instalada da GD fotovoltaica na Paraíba, nos recortes municipais, de regiões imediatas e intermediárias. Na análise municipal, a designação de João Pessoa como região de referência foi fundamentada pela sua maior capacidade instalada durante o período

compreendido entre 2014 e 2016. Nos anos subsequentes, de 2017 e 2018, tal status foi transferido para Sousa, sucedido por Campina Grande em 2019, retornando a João Pessoa em 2020, e finalmente, sendo conferido a Cabaceiras em 2021.

Figura 4.3 - Evolução do Índice de Dessemelhança de Krugman (SI) da potência instalada da GD fotovoltaica nos municípios, regiões imediatas e regiões intermediárias da Paraíba, para os valores médios dos anos de 2014 a 2017, 2018 a 2021 e 2014 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

Entre 2014 e 2017, observou-se que João Pessoa (0,10) foi o município que mais se aproximou do valor da referência (0), enquanto Lagoa Seca foi a que mais se distanciou (1,06). De 2018 a 2021, os municípios Camalaú, Caraúbas, Santo André e São Sebastião do Umbuzeiro exibiram os menores índices, indicando uma maior similaridade com a referência. Este cenário foi contraintuitivo devido à baixa potência instalada e serem cidades de pequeno porte, localizadas no interior. Em 2021, Cabaceiras (referência deste ano) teve elevada concentração no grupo de tensão B1, consequentemente conduziu os

grupos B2 e B3 a tenderem a zero. Esses fatos resultaram semelhança das demais cidades à referência, dada a predominância de um único grupo de tensão, persistindo na média de 2014 a 2021.

Observou que os municípios do Sudeste do estado apresentaram-se com maior dessemelhança na análise de 2014 a 2021 e de 2018 a 2021. Nas regiões imediatas tiveram a região de João Pessoa como referência em praticamente todo período de análise com exceção de 2018 e 2019, sendo Sousa. Entre 2014 e 2017, a região de João Pessoa apresentou uma maior semelhança com a região de referência (0,14), como era de se esperar, já que foi a região de referência na maior parte do período analisado, enquanto a região de Guarabira apresentou a maior divergência (1,21). Em 2018 a 2021, assim como de 2014 a 2021, a região que mais se assemelhou à referência continuou sendo João Pessoa, enquanto a que mais diferiu foi Itabaiana.

Nas regiões intermediárias, João Pessoa foi adotada como região de referência nos anos de 2014, 2016, 2020 e 2021, Patos em 2015, e Sousa-Cajazeiras em 2017, 2018 e 2019. Durante o período de 2014 a 2017, a região que apresentou o menor índice (0,18) foi Patos, enquanto Sousa-Cajazeiras exibiu o índice de 0,56 revelando menor afinidade. Por outro lado, nos anos de 2018 a 2021, a região que mais se aproximou da referência foi Sousa-Cajazeiras, com índice de 0,058. Observou que a cidade João Pessoa é a referência do estado, assim como a sua região imediata e intermediária, devido ser capital do estado e por ser a porta de entrada para melhores tecnologias e maiores empresas especializadas no setor, além de possuir maior população. Fujita e Thisse (2009) mostraram que as disparidades espaciais entre uma cidade analisada e sua referência podem derivar dos recursos naturais. Tal fenômeno foi perceptível na variação da irradiação solar do litoral e região semiárida. Adicionalmente, o comércio, representado pelos distritos centrais de negócios, mostrou-se predominantemente nas cidades de referência das regiões objeto de análise.

A análise regional dos municípios para cálculo do índice de Krugman, que definiu um município de referência por região intermediária. Em 2014, a referência da região intermediária de João Pessoa foi o município de João Pessoa e a da região intermediária de Patos foi o município de Patos, pois eram os únicos municípios com instalação. Em 2015, os municípios de referência das regiões intermediárias foram: de João Pessoa foi a mesma, de Campina Grande foi Lagoa Seca, de Patos foi Catolé do Rocha e de Sousa-Cajazeiras foi São José de Piranhas. Em 2016, as cidades de João Pessoa, Patos e Sousa-Cajazeiras mantiveram-se como referências, sendo Campina Grande designada como sua

própria referência. No ano subsequente, em 2017, as regiões de João Pessoa e Campina Grande preservaram suas referências inalteradas, já nas áreas de Patos e Sousa-Cajazeiras, as cidades de Patos e Sousa foram referências, respectivamente.

Nos anos seguintes, as referências permaneceram constantes, destacando a semelhança entre as referências da análise de Krugman e as cidades que dão nome às regiões intermediárias. Essas cidades geralmente eram metrópoles, capitais regionais ou centros urbanos representativos dentro do conjunto, com alto PIB, população, saúde, comércio e acesso à informação. Essa similaridade refletiu a observação de que o mercado fotovoltaico demonstrou maior evolução em municípios já consolidados em termos de desenvolvimento. Na região intermediária de João Pessoa, entre 2014 a 2021, a cidade de João Pessoa apresentou o menor índice de Krugman, dada sua constante designação como referência ao longo dos anos. Em sequência, a cidade de Marcação (0,16) exibiu um índice também reduzido, enquanto Alagoinha foi a localidade mais discrepante (1,30). De maneira análoga, na região intermediária de Campina Grande, Campina Grande foi a cidade de menor índice de Krugman, seguida por Amparo (0,29), ao passo que Umbuzeiro (1,02) se destacou como a mais divergente.

Na região de Patos, a cidade que mais se aproximou da referência foi Bom Sucesso (0,11), enquanto Passagem revelou-se como a mais distinta com índice de 1,14. Na região intermediária de Sousa-Cajazeiras, Sousa mostrou o menor índice, seguida por Triunfo (0,38), enquanto Marizópolis, ao apresentar um índice elevado (0,6972) situando-se no segundo quartil da classificação, contribuiu para conferir à região de Sousa-Cajazeiras uma característica de relativa dissimilaridade. Notou que o índice de Krugman apresenta-se de maneira não uniforme e linear no estado, tal qual Longhi et al. (2014). Esta análise da distribuição da potência instalada em diferentes níveis geográficos ofereceu uma perspectiva holística e informada sobre o panorama da GD fotovoltaica na região.

A Figura 4.5 mostra a evolução do índice de Hoover para potência instalada das unidades geradoras na Paraíba, observando os grupos de tensão, de 2014 a 2021. Os grupos de tensão A3 e AS estiveram presentes apenas em Patos e o índice apresentaram-se de forma pontual, com maior valor nos municípios por existirem em maior quantidade e terem valor concentrado, com tendência monopolística. Em seguida, tem-se regiões imediatas e intermediárias, respectivamente, de acordo com a concentração da potência instalada. Os dois grupos apresentaram valores de 0,49, 046 e 0,37, para municípios, região imediata e intermediária, respectivamente. O B4 esteve presente apenas em

Monteiro e apresentou-se de maneira única em 2019 e é análogo às instalações dos grupos A3 e AS.

Figura 4.4 - Evolução do Índice de Hoover para a Geração Distribuída Fotovoltaica na Paraíba, para os anos de 2014 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

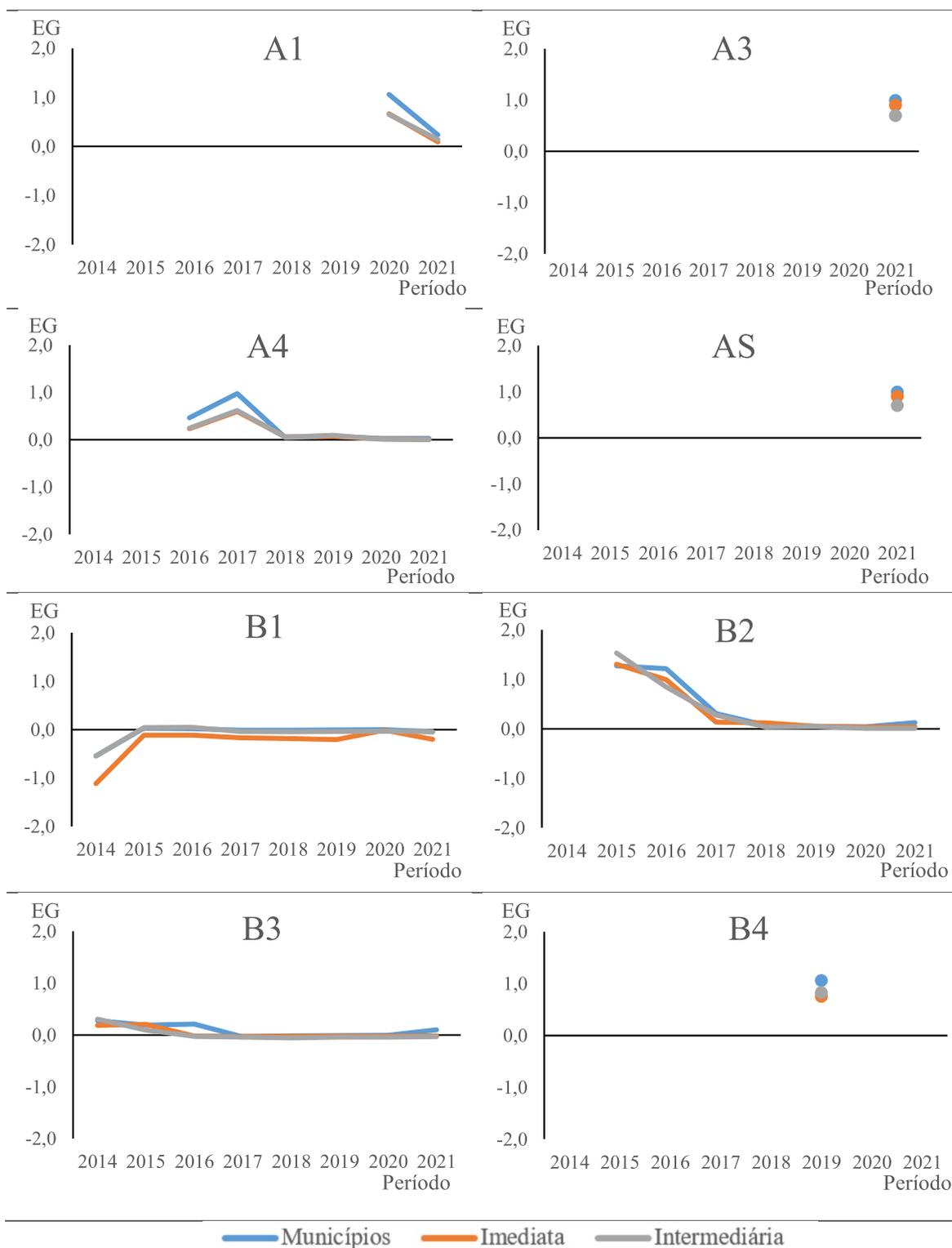
O grupo A1 foi visto no gráfico com curva que diminuiu no decorrer dos anos, isso aconteceu pois o grupo estava presente apenas no município de Pilar em 2020 e no ano seguido tornou-se mais distribuído, estendendo-se para São João do Rio do Peixe, Esperança, Gurinhém, Pilar e Santa Rita, diminuindo sua concentração. O índice variou de 0,49 para 0,48, na análise municipal, de 0,46 para 0,36 nas regiões imediatas e de 0,37 para 0,29 para regiões intermediárias. Esta maior distribuição da tecnologia foi reflexo de fatores além da redução de custos, como o empoderamento do consumidor para gerar sua própria energia, facilidade de instalação e rapidez das empresas que fornecem este serviço, além do aumento da conscientização pública a respeito dos benefícios ambientais proporcionados por esta tecnologia.

No grupo A4, verificou que o valor mais elevado ocorreu no primeiro ano, com índices de 0,4977, 0,4666 e 0,375 para municípios, regiões imediatas e intermediárias, respectivamente. Este pico foi atribuído à presença exclusiva de instalações em João Pessoa, refletindo comportamentos monopolísticos. Adicionalmente, as curvas subsequentes obedecem à sequência de municípios, regiões imediatas e intermediárias. Por outro lado, o grupo B1 apresentou um índice de 0,723, sugerindo uma proximidade com a configuração de monopólio nas cidades de Patos e Cabaceiras. Essa observação alinha-se com as expectativas quanto à disposição das curvas, as quais seguem a ordem hierárquica de distribuição entre municípios, regiões imediatas e intermediárias.

A Figura 4.6 apresenta a evolução do índice de Ellison-Glaeser da GD fotovoltaica para os grupos de tensão da Paraíba, de 2014 a 2021. Na análise municipal do grupo B1 notou uma ascensão na curva nos anos de 2020 e 2021, tendo índice nos valores de 0,6160 e 0,7228, respectivamente. Isto ocorreu por Patos, em 2020, e Cabaceiras, em 2021, possuírem grande concentração de sistemas do grupo de tensão B1, aproximando-se do monopólio. As curvas do grupo B3 e B2 tiveram comportamento esperado, pois as curvas municipais e regionais se comportaram similarmente, isto foi reflexo das unidades geradores estarem espacialmente próximas e tendendo a aglomeração, nos anos iniciais. Com o passar dos anos, a curva foi diminuindo, mostrando a desconcentração espacial, tal qual encontrado por Lautert e Araújo (2007). Isto ocorreu por influência desaglomerativa que pode ser a maior presença de empresas que forneceram este serviço no estado e incentivos fiscais e facilidades no financiamento do sistema. O grupo B2, embora presente desde 2015, exibiram exclusivamente valores positivos, sugerindo uma propensão à aglomeração. Em 2015, as regiões intermediárias alcançaram um índice de 1,528, o qual representa o ápice registrado neste estudo. O B4, presente no ano de 2019,

exibiu um valor positivo, denotando uma marcada tendência à aglomeração, visto que esteve uma cidade na Paraíba, Monteiro.

Figura 4.5 - Evolução do Índice de Ellison-Glaeser da Geração Distribuída Fotovoltaica para os grupos de tensão na Paraíba, para os anos de 2014 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

O grupo de tensão A1, em 2020, apresentou valores positivos e teve uma queda no índice, em relação ao anterior, mostrando que sua concentração diminuiu, com maior distribuição, em decorrência de sua disseminação no estado. Almeida e Rocha (2018) encontraram resultados semelhantes para os setores da indústria de transformação e setores intensivos em tecnologia, entre o período de 2002 e 2014. Os grupos A3 e AS, presentes apenas no ano de 2021, apresentaram valores positivos e pontuais, mostrando tendência à aglomeração, principalmente na análise municipal, que apresentou maior valor dos índices. Já o A4, presente nos anos de 2016 a 2021, apresentou valores positivos com aumento em 2017, mostrando aglomeração e, nos anos seguintes, queda do índice refletindo tendência à dispersão.

O grupo de tensão B1 se destacou por apresentar maior quantidade de valores negativos, uma vez que é o mais predominante nas cidades do estado e isto refletiu alta distribuição espacial, em comparação aos demais grupos. Isto ocorreu como reflexo de forças desaglomerativas, como as políticas de incentivo com regulamentação governamental favoráveis como a REN 482/2012 e a REN 687/2015. Os autores Kamal e Sundaram (2019) também encontraram que os grupos com maior concentração são os com alta tecnologia e maior capital de investimento (neste caso, os grupos de alta tensão), sendo o oposto verdadeira para alta distribuição. Também podem se enquadrar nesta força, o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a redução dos custos dos sistemas solares, com a isenção do ICMS das operações com equipamentos e componentes para energia solar pelo Convênio ICMS 101/97. Além de políticas ambientais para a redução da emissão de carbono, como os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, que podem impulsionar a adoção do uso desta tecnologia, tornando-a mesmo aglomerada.

4.4 CONCLUSÃO

O trabalho analisou a disparidade regional da potência instalada da GD fotovoltaica na Paraíba por meio da localização espacial e concentração, de 2014 a 2021 para auxiliar o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU. Os resultados mostraram crescimento significativo em todos os anos desde o início, com destaque para o intervalo de 2014 a 2016 com aumento de quase 200% a.a. Foi possível notar destaque das regiões do litoral e semiárido, como reflexo do pioneirismo no estado e alto desenvolvimento até o 2021.

O QL evidenciou uma maior especialização em regiões específicas dos grupos mais comuns (B1 e B3) durante os primeiros anos da amostra. Em contraste, nos anos finais, observou-se uma distribuição mais ampla. A análise das regiões intermediárias revelou menor especialização, uma vez que ocorre a agregação de municípios com potências instaladas tanto elevadas quanto reduzidas. Pelo SI, foi vista a heterogeneidade espacial que difere as cidades da sua referência. Observou-se a predominância de João Pessoa como região de referência para análise municipal e regional, por ser a capital do estado. Também foi possível notar que as referências adotadas para o cálculo do índice, em sua maioria, foram as cidades destaques do IBGE.

O índice de Hoover mostrou que a análise municipal apresenta valores que se aproximam ao monopólio, por ter os valores concentrados. Em 2020 e 2021, o grupo B1 teve índice elevado, se aproximando a 1, por Patos e Cabaceiras terem grande concentração de instalações do grupo B1. O Índice de Ellison-Glaeser mostrou a tendência econômica de crescimento e as forças desaglomerativas que influenciam o desenvolvimento do uso desta fonte energética, por isso o grupo B1 apresentou alta quantidade de valores negativos.

O estudo mostrou a situação da GD fotovoltaica na Paraíba, abordando sua disponibilidade, distribuição espacial e estrutura de mercado. Os resultados apresentam informações que podem ser utilizadas para orientar políticas públicas e apoiar a tomada de decisões, identificando as áreas onde o mercado da GD fotovoltaica está mais dinâmico e verificar locais estratégicos para novos investimentos. A nível nacional, esta metodologia pode ser utilizada para avaliar portfólio da matriz elétrica e/ou energética de outras regiões, a partir de outras fontes de energia renováveis.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração Distribuída. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empresendimentos-de-geracao-distribuida. Acesso em: 19 abr. 2022.

ALMEIDA, E. T., ROCHA, R. M. (2018). Labor pooling as an agglomeration factor: Evidence from the Brazilian Northeast in the 2002–2014 period. *Economia*, 19(2), 236-250.

ALQUHTANI, S. Spatial distribution of public elementary schools: A case study of Najran, Saudi Arabia. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, v. 22, n. 2, p. 705-725, 2023.

ARAÚJO, J. E. S.; MOURA, K. H. de L.; ROCHA, R. de M. Evidências da distribuição espacial das indústrias do Nordeste brasileiro a partir do índice de Ellison e Glaeser. **Planejamento e Políticas Públicas**, v. 49, pp. 291-319, 2017.

CAI, S., GOU, Z.. Impact of COVID-19 on the energy consumption of commercial buildings: A case study in Singapore. **Energy and Built Environment**, v. 5, n. 3, p. 364-373, 2024.

CASSEY, A. J., SMITH, B. O. Simulating confidence for the Ellison–Glaeser index. **Journal of Urban Economics**, v. 81, p. 85-103, 2014.

CHARUMBIRA, M.; SUNDE, T. Seller concentration in the grain milling industry. **American Journal of Economics and Business Administration**, vol. 2, no. 3, pp. 247-252, mar. 2010.

COELHO JUNIOR, L. M., SANTOS JÚNIOR, E. P., BORGES, L. A. C., & SILVA, M. L. D.. Specialization and location of the gross value production of native wood products in Paraíba's microrregions (1994–2017). **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 192-204, 2020.

COMMENDATORE, P., KUBIN, I., SUSHKO, I. Big or small? A new economic geography model with an endogenous switch in the market structure. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 161, p. 112257, 2022.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA (CONFAZ). Convênio ICMS nº 16/15. Aprova o regimento o Conselho Nacional de Política Fazendária -CONFAZ. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15>. Acesso em 10 fev. 2023.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA (CONFAZ). Convênio ICMS nº 101/97. Aprova o regimento do Conselho Nacional de Política Fazendária -CONFAZ. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97> Acesso em 10 fev. 2023.

CUNHA, D. P., & PONTES, K. V. Desalination plant integrated with solar thermal energy: a case study for the Brazilian semi-arid. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129943, 2022.

DECEWICZ, A. Regional income disparities in central-eastern europe—a markov model approach. In: **The 7th International Days of Statistics and Economics**, 2013.

DIXON, R., FREEBAIRN, J., & LIM, G. C.. Time-varying equilibrium rates of unemployment: an analysis with Australian data. **Australian Journal of Labour Economics**, v. 10, n. 4, p. 205-225, 2007.

DOU, Y., LUO, X., DONG, L., WU, C., LIANG, H., & REN, J.. An empirical study on transit-oriented low-carbon urban land use planning: Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) on Shanghai, China. **Habitat International**, v. 53, p. 379-389, 2016.

ELLISON, G; GLAESER, E. L. Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. **Journal of Political Economy**, v. 105, n. 5, p. 889-927, 1997.

ELLISON, G.; GLAESER, E. Geographic concentration as a dynamic process. NBER Working Paper N. 6270, 1997.

FUJITA, M., THISSE, J.F.. New economic geography: an appraisal on the occasion of Paul Krugman's 2008 Nobel Prize in Economic Sciences. **Regional Science and Urban Economics**, v. 39, n. 2, p. 109-119, 2009.

GAUTAM, A., SHANKAR, R., VRAT, P.. End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 65-77, 2021.

ELLISON, G; GLAESER, E. L. Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. **Journal of Political Economy**, v. 105, n. 5, p. 889-927, 1997.

Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. **Journal of Political Economy**, v. 105, n. 5, p. 889-927, 1997.

GOSCHIN, Z.; CONSTANTIN, D. L.; ROMAN, M.; ILEANU, B. Specialisation and Concentration Patterns in the Romanian Economy. **Journal of Applied Quantitative Methods**, v. 4, p. 95-111, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-power-generation-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

HADDAD, P. R.; BOISIER, S.; FERREIRA, C. M. C.; ANDRADE, T. A. **Economia Regional: Teorias e Métodos de Análise**. Fortaleza: BNB/ETENE, 1989.

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, 2009.

KAMAL, F; SUNDARAM, A. Do institutions determine economic Geography? Evidence from the concentration of foreign suppliers. **Journal of Urban Economics**, v. 110, p. 89-101, 2019.

KRUGMAN, P. Geography and trade. Cambridge: MIT Press, 1993.

KRUGMAN, P. Increasing Returns and Economic Geography. **Journal of Political Economy**, v. 99, p. 483-499, 1991.

LASAGNI, A., SFORZI, F.. Locational determinants of the ICT sector across Italy. Department of Economics, Parma University (Italy), 2007.

LAIMON, M., YUSAF, T., MAI, T., GOH, S., & ALREFAE, W.. A systems thinking approach to address sustainability challenges to the energy sector. **International Journal of Thermofluids**, p. 100161, 2022.

LAUTERT, V; ARAÚJO, N. C. M. Concentração industrial no Brasil no período 1996-2001: uma análise por meio do índice de Ellison e Glaeser (1994). **Economia Aplicada**, v. 11, n. 3, p. 347-368, 2007.

LEE, J., SHEPLEY, M.M.C.. Benefits of solar photovoltaic systems for low-income families in social housing of Korea: Renewable energy applications as solutions to energy poverty. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101016, 2020.

LONG, L., NUCCI, A.. The Hoover index of population concentration: A correction and update. **The Professional Geographer**, v. 49, n. 4, p. 431-440, 1997.

LONGHI, C.; MUSOLESI, A.; BAUMONT, C. Modeling structural change in the European metropolitan areas during the process of economic integration. **Economic Modelling**, v. 37, p. 395-407, 2014.

MARTINS, K. D. L. D. C., MELQUÍADES, T. F., REZENDE, J. L. P. D., & COELHO JUNIOR, L. M.. Plant extractivism production disparity between Northeast Brazil and Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 25, 2018.

MATTEI, T. S. Métodos de Análise Regional: um estudo de localização e especialização para a Região Sul do Brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 38, n. 133, p. 227-243, 2018.

MATHUR, N.; SINGH, S.; SUTHERLAND, J. W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104649, 2020.

MILETIĆ, Radmila. Regional specialization in Serbia during the period 2001–2015. **Зборник радова Географског института "Јован Цвијић" САНУ**, v. 72, n. 1, p. 67-83, 2022.

NĂSTASE, G., ȘERBAN, A., DRAGOMIR, G., BREZEANU, A. I., & BUCUR, I.. Photovoltaic development in Romania. Reviewing what has been done. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 523-535, 2018.

PIACENTI, C.A., ALVES, L.R., LIMA, J.F.. O perfil locacional do emprego setorial no Brasil. **Revista Econômica do nordeste**, v. 39, n. 3, p. 482-502, 2008.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados e estatística. 2022. Disponível em: < https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx>. Acesso em: 25 jan. 2023;

RESENDE, M., WYLLIE, R.. Aglomeração industrial no Brasil: um estudo empírico. **Estudos Econômicos**, v. 35, p. 433-460, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2022.

ROGERSON, P.A.; PLANE, D.A. The Hoover index of population concentration and the demographic components of change: An article in memory of Andy Isserman. **International Regional Science Review**, v. 36, n. 1, p. 97-114, 2013.

SAIDANI, M., YANNOU, B., LEROY, Y., CLUZEL, F., & KENDALL, A.. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542-559, 2019.

SAMPAIO, P.G.V., GONZÁLEZ, M.O.A.. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SANTOS JÚNIOR, E. P., SILVA, M. V. B., SIMIONI, F. J., ROTELLA JUNIOR, P., MENEZES, R. S. C., & COELHO JUNIOR, L. M.. Location and concentration of the forest bioelectricity supply in Brazil: A space-time analysis. **Renewable Energy**, v. 199, p. 710-719, 2022.

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. 2015. Disponível em: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E. Acesso em: 01 mar. 2023.

VAN DEN BRAKEL, Marion; LOK, Reinder. The Robin Hood Index Adjusted for Negatives and Equivalised Incomes. **Journal of Official Statistics**, v. 37, n. 4, p. 1047-1058, 2021.

VAN OPSTAL, W., SMEETS, A.. Circular economy strategies as enablers for solar PV adoption in organizational market segments. **Sustainable Production and Consumption**, v. 35, p. 40-54, 2023.

WANG, Y; ZHUO, Y; LIU, T. Population Dynamics in China's Urbanizing Megaregion: A Township-Level Analysis of the Beijing–Tianjin–Hebei Region. **Land**, v. 11, n. 9, p. 1394, 2022.

WAZZAN, K.. The spatial distribution of the basic education schools in Lattakia City (Syria). **Journal of Educational and Social Research**, v. 7, n. 1, p. 71-71, 2017.

Weber A, 1909 *Über den Standort der Industrien* (JCB Mohr, Tübingen); English translation: *The Theory of the Location of Industries* (Chicago University Press, Chicago, IL, 1929).

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.

YU, Z; LIU, X. Urban agglomeration economies and their relationships to built environment and socio-demographic characteristics in Hong Kong. **Habitat International**, v. 117, p. 102417, 2021.

5 ARTIGO 4 - DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA PARAÍBA

RESUMO

Este estudo teve como objetivo apresentar uma metodologia de análise de distribuição e dependência espaço-temporal da potência per capita da Geração Distribuída (GD) fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021. Os dados referentes à potência instalada, em quilowatts (kW), foram obtidos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e as estatísticas populacionais e o Produto Interno Bruto (PIB) per capita dos municípios da Paraíba foram obtidos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foi utilizada a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) e, como critérios de vizinhança, as matrizes de ponderação dos k-vizinhos mais próximos e por distância, além dos índices de Moran global (I de Moran) e local (LISA) para identificar a presença de dependência espacial. O I de Moran Global para regiões imediatas e municípios da Paraíba teve comportamento semelhante, com início do índice negativo e, em seguida, tornou-se positiva, pelo aumento de regiões com a potência instalada no decorrer dos anos. O LISA mostrou *clusters* do tipo Alto-Alto na região do semiárido da Paraíba para os grupos mais populares de baixa tensão (B1, B2 e B3). O conhecimento do padrão espacial da GD fotovoltaica apresentado neste estudo pode auxiliar aos atores políticos, instituições e terceiro setor em arranjos para políticas públicas e direcionamento de investimentos públicos e privados.

Palavras-chave: Economia de baixo carbono, energias renováveis, economia espacial.

**ARTICLE 4 - DISTRIBUTION AND SPATIAL DEPENDENCE OF
DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION IN THE STATE OF
PARAÍBA**

ABSTRACT

This study aimed to present a methodology for analyzing the distribution and space-time dependence of the per capita power of photovoltaic Distributed Generation (DG) in Paraíba, from 2014 to 2021. The data referring to the installed power, in kilowatts (kW), were obtained from the National Electric Energy Agency (ANEEL), and population statistics and Gross Domestic Product (GDP) per capita of the municipalities of Paraíba were obtained through the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Exploratory Spatial Data Analysis (AEDE) was used, and as neighborhood criteria, the weighting matrices of the k-nearest neighbors and by distance were employed, in addition to the global Moran indices (Moran's I) and local (LISA) to identify the presence of spatial dependence. The Global Moran's I for immediate regions and municipalities in Paraíba had a similar behavior, with the index starting negative and then becoming positive, due to the increase in regions with installed power over the years. LISA showed High-High clusters in the semi-arid region of Paraíba for the most popular low voltage groups (B1, B2, and B3). Knowledge of the spatial pattern of photovoltaic DG presented in this study can assist political actors, institutions, and the third sector in arranging public policies and directing public and private investments.

Keywords: Low carbon economy, renewable energy, space economy.

5.1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida pela conversão da luz do sol em eletricidade, por meio do efeito fotovoltaico que gera tensão e corrente em materiais (AFTAB et al., 2022). É uma fonte energética promissora na atualidade, caracterizada por sua geração rápida, segura e mais limpa. Esta alternativa renovável desempenha um papel proeminente e demonstra uma tendência de expansão global, por priorizar o bem-estar humano e a conservação do meio ambiente (DONGSHENG; WENJIA, 2021).

Esta fonte energética auxilia na diversificação da matriz energética global e garante segurança e independência energética, além de fortalecer a estabilidade do sistema elétrico. Tal diversificação desempenha um papel fundamental no sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pelas Nações Unidas, que busca garantir o acesso universal a uma energia confiável, sustentável e moderna para todos (BRUNET et al., 2022; GEBARA, 2023). Alguns fatores restringem a aplicação da energia solar como a dependência das condições climáticas, necessitando de soluções de armazenamento para suprir demandas em períodos nublados e noturnos. Além disso, deve considerar os impactos ambientais adversos associados aos painéis solares após o término de sua vida útil (ABDALLA et al., 2022; STEVOVIC et al. 2021;).

Em 2021, a *International Renewable Energy Agency* - IRENA (2022) mostrou que a capacidade instalada de energias renováveis mundial era de 3.093 GW e a energia solar fotovoltaica representava 28% desta capacidade, com 866 GW. A China liderou o ranking mundial de capacidade instalada fotovoltaica, com 392 GW, aproximadamente 36% da potência instalada fotovoltaica, seguida dos Estados Unidos (111 GW) e Japão (83 GW), o Brasil ocupava a oitava posição com 24 GW. No Brasil, a energia solar fotovoltaica apresenta uma vantagem geográfica devido à sua localização em uma zona tropical, onde os raios solares incidem quase perpendicularmente. A região Nordeste do Brasil tem alto potencial para a geração de energia solar fotovoltaica, resultando em altos níveis de irradiação solar e alta eficiência, com perspectivas promissoras para o futuro desta tecnologia no país (FERREIRA et al., 2023; PEREIRA et al., 2017;).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2022) mostrou que, em 2021, o Brasil teve 458 mil novas unidades geradoras de Geração Distribuída – GD fotovoltaica, totalizando 867 mil no território brasileiro. Esses sistemas contribuíram com a geração de 10,32 TWh, representando 1,51% da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), que totaliza 679,2 TWh. A capacidade instalada desses sistemas atingiu 9,8 GW, distribuídos da seguinte forma: 43% em sistemas residenciais, 34% em sistemas comerciais, 14% em

sistemas rurais e 8% em sistemas industriais. Minas Gerais foi o estado brasileiro com maior capacidade instalada com 1,5 GW e 131 mil unidades geradoras, seguido de São Paulo com 1,16 GW e 130 mil sistemas instalados e Rio Grande do Sul com 1,07 GW e 109 mil unidades instaladas. A Paraíba esteve na 18ª posição no ranking do Brasil, com 163 MW e 12 mil sistemas geradores distribuídos em 217 municípios (EPE, 2022).

A análise espacial surge para compreender as dinâmicas de distribuição geoespaciais dessa fonte de energia no estado. Ela permite identificar padrões espaciais e áreas com diferentes níveis de adoção dessa fonte energética. Essa análise, que examina a distribuição e interação de fenômenos geográficos, utiliza ferramentas como estatísticas espaciais. Essas técnicas auxiliam na identificação de *clusters* e correlações espaciais, fornecendo percepções para o planejamento e tomada de decisões (MALIK, et al., 2023). Ao lidar com recursos ambientais, é crucial considerar as questões socioeconômicas locais, pois desempenham um papel fundamental na sustentabilidade e eficácia das práticas ambientais. Isso envolve considerar a distribuição dos benefícios, a cultura local e a participação comunitária (LI et al., 2022).

A Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) é uma abordagem que integra técnicas estatísticas espaciais para compreender a estrutura, padrões e distribuição geográfica da 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; MATHUR, 2015). Ao compreender essa relação, é possível identificar áreas com potencial de expansão e elaborar planos para atender à crescente demanda pelo uso da tecnologia. 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 cidades vizinhas (ANSELIN, 1988; LI et al., 2022; MADDISON, 2007).

Nos últimos anos, observou-se aumento em agregar a análise espacial à modelagem econômica. Dunn et al. (2019) analisaram os dados de interrupção de energia e identificaram heterogeneidade espacial e temporal na confiabilidade da rede elétrica. Wang et al. (2020) apresentaram um padrão espaço-temporal e fatores determinantes para os resíduos sólidos urbanos na China. Zhang (2021) mostrou as características espaciais da energia de baixo carbono na China. Kumari (2019) estudou o padrão espacial da temperatura da superfície terrestre em relação ao uso do solo ao redor de uma usina termelétrica na Índia. Lv, Liu e Xu (2022) avaliaram o impacto da tecnologia de informação sobre o consumo de energia renovável e constataram que o desenvolvimento

desta tecnologia aumenta o consumo das energias renováveis, assim como há repercussão espacial, com influência da vizinhança. Coelho Junior et al. (2018) analisaram a distribuição e dependência espacial da produção de lenha no Nordeste brasileiro e mostraram a importância das questões espaciais no desenvolvimento das políticas públicas com a influência positiva da vizinhança. Já Santos Júnior et al. (2022) analisaram a bioeletricidade florestal no Brasil e constataram a presença de clusters de alta potência no eixo Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, as térmicas do Paraná e as térmicas do Mato Grosso do Sul.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi apresentar uma metodologia para analisar a distribuição e a dependência espaço-temporal GD fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021. Esta exploração 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 obtidos possuem potencial significativo para orientar os tomadores de decisão em políticas públicas locais, contribuindo para a formulação e implementação de estratégias sustentáveis na gestão energética regional.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

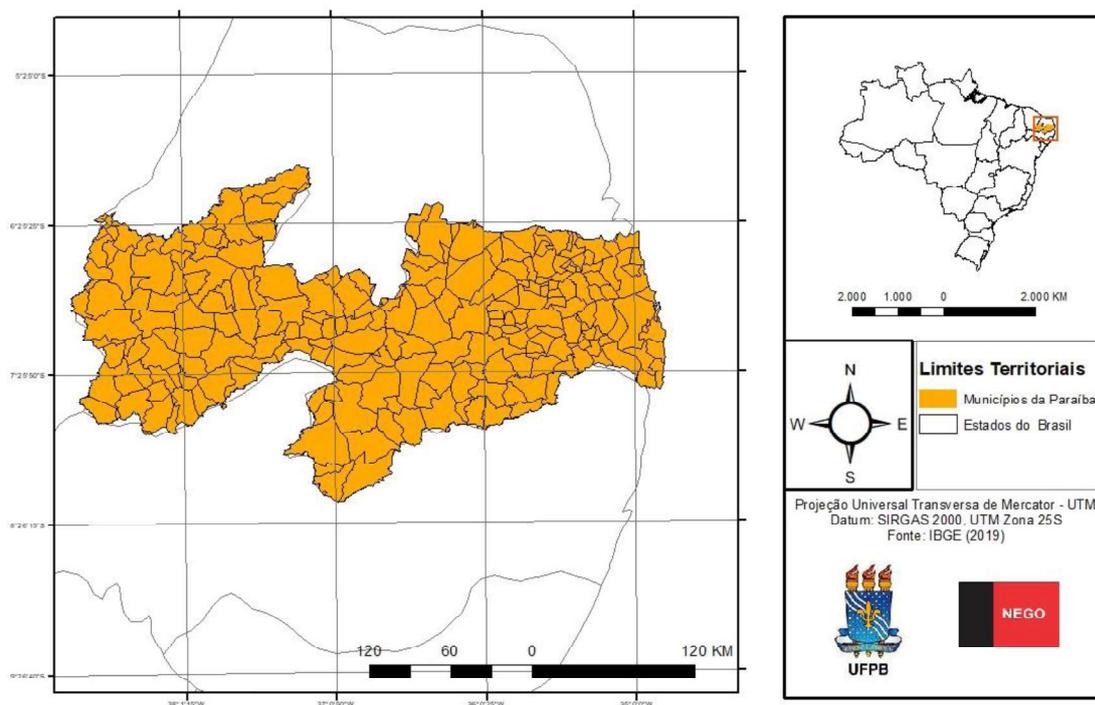
Este estudo abordou os municípios, regiões imediatas e intermediárias do estado da Paraíba, localizada no Nordeste do Brasil, com área de aproximadamente 56.570 km² (ATLAS SOLARIMÉTRICO DA PARAÍBA, 2023). De acordo com a Figura 5.1.

5.2.2 Objeto de estudo

Os dados da potência instalada da Paraíba foram fornecidos, em quilowatt (kW), pela Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração (SCG) e disponíveis pelo Sistema de Informações (SIGA) da ANEEL, de 2014 a 2021. Estas informações foram agrupadas por recortes regionais: municípios e regiões imediatas. As unidades geradoras foram classificadas de acordo com o grupo de tensão que pode ser de alta ou baixa tensão. A alta tensão – A é a junção dos grupos: A1 com tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV, A2 com tensão de fornecimento entre 88 kV e 138 kV, A3 com tensão de fornecimento de 69 kV e AS com sistema subterrâneo inferior a 2,3 kV. Já a baixa tensão – B tem tensão de fornecimento inferior a 1 kV e é a junção dos grupos:

B1, classe residencial; B2, classe rural; B3, demais classes como comerciais, industrial, poder público ou serviço público; B4, iluminação pública.

Figura 5.1. Mapa de localização da Paraíba.



Utilizou-se os dados populacionais de 2000 e 2021 disponíveis do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) e com base na taxa geométrica de crescimento (TGC), Equação 5.1, estimou-se a população dos recortes regionais da Paraíba para o período de 2014 a 2020 (IBGE, 2000; 2021).

$$TGC = \left[\sqrt[\Delta t]{\frac{V_f}{V_0}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (5.1)$$

onde, V_F = potência instalada (kW) da geração distribuída fotovoltaica no ano final; V_O = potência instalada (kW) da geração distribuída fotovoltaica no ano inicial; Δt = variação do tempo em anos.

Para caracterizar a trajetória da potência da geração distribuída (GD) fotovoltaica na Paraíba, foi delimitado o período compreendido entre 2014 e 2021, considerando os diversos grupos de tensão existentes no estado. Os ganhos e decréscimos na potência instalada foram avaliados pela TGC Para estabelecer uma compreensão mais aprofundada da interação entre a GD fotovoltaica na Paraíba e o Produto Interno Bruto (PIB) per capita dos municípios, foi efetuada uma comparação entre as 20 cidades que apresentaram as

maiores potências instaladas de GD fotovoltaica no estado e as 20 cidades de maior PIB per capita, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020).

5.2.3 Análise Exploratória de Dados Espaciais

Na AEDE verifica-se instabilidades espaciais, avalia-se a autocorrelação espaciais e identifica-se a presença de *clusters* e *outliers* (COELHO JUNIOR et al., 2018). Este procedimento estatístico é conjunto de técnicas que analisam os dados espaciais formulando hipóteses com base na geografia econômica para identificar a estrutura espacial e correlação dos recursos estudados (SYMANZIK, 2014; DOU et al., 2016). Os principais métodos da AEDE são a heterogeneidade espacial e análise de dependência espacial, dentro na análise de dependência espacial tem-se a divisão entre a análise de autocorrelação espacial global e local (ANSELIN; CHO, 2002).

A autocorrelação espacial mostra quanto certa variável da região *i* (potência elétrica instalada per capita de GD fotovoltaica) relaciona-se com a mesma variável na região vizinha *j*. Uma técnica importante para AEDE é a construção da matriz de vizinhança, de proximidade, de distância ou de conectividade. Esta matriz mostra a relação espacial de cada área que pode ligar-se pela lista de vizinhos de cada polígono, pela conexão do comprimento da fronteira comum ou pela distância entre eles (O’SULLIVAN; UNWIN, 2010). Não haverá nenhuma região sem vizinho, tornando vantajosa a utilização desse tipo de método por proporcionar o equilíbrio da conectividade da matriz. A proximidade é a base do critério de conexão geográfica da matriz de pesos espaciais, definindo-se de acordo com a contiguidade e/ou distância geográfica (ALMEIDA, 2012).

A matriz de pesos baseia-se na contiguidade, sendo uma matriz binária que as regiões possuem a mesma fronteira física, em pelo menos um ponto tendo latitudes ou longitudes iguais, assim possuindo maior interação espacial (FISCHER; WANG, 2011). Formalmente, define-se como:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i \text{ e } j \text{ são contíguos;} \\ 0, & \text{se } i \text{ e } j \text{ não são contíguos;} \end{cases}$$

Encontrou problema em conceituar a fronteira geográfica por meio da observação de um mapa, então faz alusão ao movimento das peças de um tabuleiro de xadrez. É mostrado na Figura 5.2 a convenção de contiguidade mais utilizada na literatura, “rainha” (*queen*), para caso as fronteiras possuam extensão diferente de zero e os vértices são

considerados contíguos. A convenção “torre” (*rook*) com apenas as fronteiras físicas com extensão diferente de zero consideradas e o “bispo” (*bishop*), apenas os vértices são considerados.

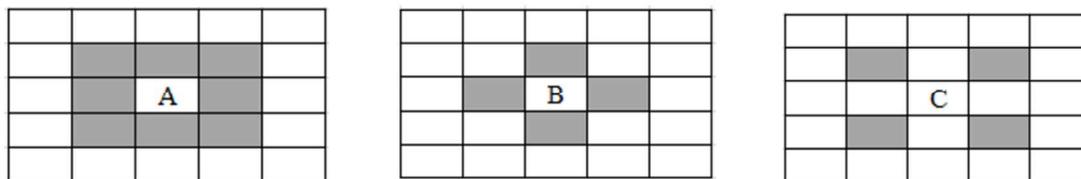


Figura 5.2: Convenção (A) “rainha”, (B) “torre” e (C) “bispo” de contiguidade.

Fonte: Almeida (2012).

Outro critério de proximidade utilizado é a distância geográfica que mostra que duas regiões geograficamente próximas têm maior relação. Na literatura é usualmente adotada a matriz de k vizinhos mais próximos, $w_{ij}(k)$, que se baseia na distância geográfica das regiões, definido por (ALMEIDA, 2012):

$$w_{ij}(k) = \begin{cases} 1, & \text{se } d_{ij} \leq d_i(k); \\ 0, & \text{se } d_{ij} > d_i(k); \end{cases}$$

em que, d_{ij} = distância entre as regiões i e j . $d_i(k)$ = distância para a região i possuir k vizinhos. A análise exploratória de dados espaciais desenvolve-se baseada na análise da autocorrelação espacial e global (CHEN, 2022). Neste estudo, optou-se por empregar a convenção do tipo "rainha", uma vez que é amplamente reconhecida na literatura, conforme Almeida (2012).

5.2.3.1 I de Moran Global

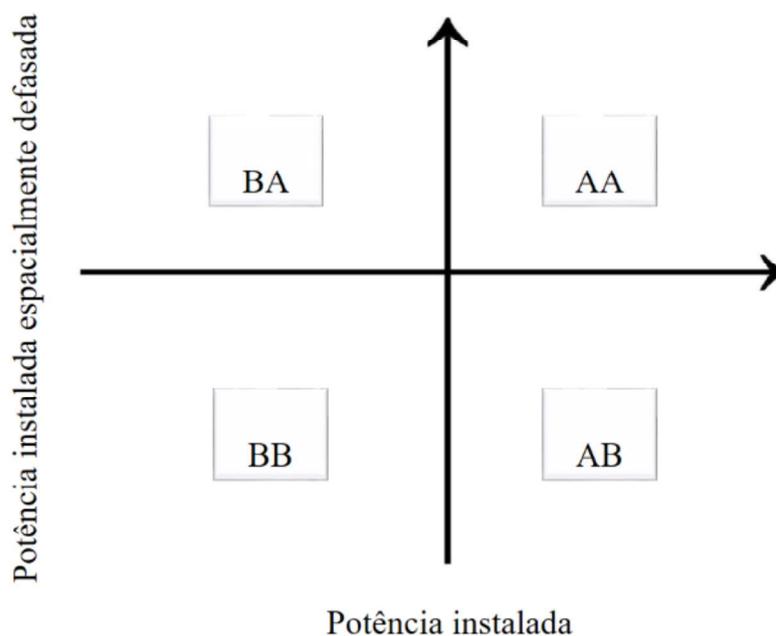
A autocorrelação espacial global é classificada com teste de hipótese nula de localização aleatória (ANSELIN, 2001). O Índice Global de Moran é uma das maneiras mais utilizadas para medir autocorrelação espacial, considera-se como um indicador crítico que ajuda a validar estatisticamente os padrões (FU et al., 2014; WANG, 2020). Este índice também determina se a variável é agrupada, dispersa ou aleatória baseando-se nos valores e nos locais analisados (CLIFF et al., 1981; YANG et al., 2018a). A suposição básica, para a estatística estudada, é que os valores são organizados de modo aleatório na área geográfica, além de serem independentes (YANG et al., 2018b). Para quantificar o Índice Global de Moran utilizou-se a Equação 5.2.

$$I_{Moran_Global} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5.2)$$

onde, n = número de análises, w_{ij} = valor do elemento ij da matriz de proximidade espacial, Y_i = potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região i , Y_j = potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região j , \bar{Y} média da potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica.

As variáveis são espacialmente independentes quando o índice calculado tiver valor nulo (SILVA et al., 2011). A autocorrelação global é positiva quando os valores altos ou baixos de uma variável aleatória possuem tendência à aglomeração no espaço, sendo dependentes. Este indicador terá sinal negativo quando houver heterogeneidade espacial, com tendência a ser cercada por dissimilaridade (LE GALLO; ERTUR, 2003). Os resultados foram mostrados com base no diagrama de espelhamento da Figura 5.3.

Figura 5.3: Diagrama de Dispersão de Moran.



Fonte: Coelho Junior et al. (2018).

O Índice de Moran Global mostra que com elevada potência instalada per capita cercada de valores altos da mesma variável, encontra-se o padrão AA (Alto-Alto). Os valores com baixa potência instalada per capita, cercada por regiões com baixa potência instalada per

capita, mostra-se como padrão BB (Baixo-Baixo). Quando encontra-se alta oferta de GD fotovoltaica per capita cercada de regiões com baixa oferta tem-se o padrão AB (Alto-Baixo), o padrão BA (Baixo-Alto) ocorre de forma análoga ao anterior, com baixa oferta de GD fotovoltaica com vizinhos com alta oferta. Se o valor do índice for positivo, indica que relaciona-se de modo positivo e que os valores sendo altos ou baixos estão cercados de valores da mesma natureza que a sua, o valor negativo é análogo.

5.2.3.2 I de Moran Local

O Índice de Moran Local (LISA) é utilizado para uma exploração detalhada permitindo avaliar e classificar os padrões, além de identificar agrupamentos (ANSELIN, 1995). Este indicador é uma espécie de decomposição do Índice de Moran Global que permite a elaboração de mapas, proporcionando análise detalhada do indicador global. (MONTEIRO et al., 2004). O I de Moran Local estuda locais individuais, possibilitando a identificação de *hotspots* (pontos quentes) que compara a variável em regiões vizinhas e entrega informações ligadas à localização dos *clusters* (alto-alto ou baixo-baixo) espaciais e *outliers* (alto-baixo ou baixo alto), assim como a sua correlação (TSAI; PERNG, 2011). O I Moran local é quantificado de acordo com a Equação 5.3.

$$I_{Moran_local} = (Y_i - \bar{Y}) \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5.3)$$

n

onde, n = número de análises, w_{ij} = valor do elemento ij da matriz de proximidade espacial, Y_i = potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região i , Y_j = potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região j , \bar{Y} média da potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica.

O índice positivo implica que a localização estudada tem valores iguais aos seus vizinhos sendo alto ou baixo e são consideradas agrupamentos espaciais (*clusters*). Já o valor negativo elevado indica que a localização analisada é um *outlier* espacial que possui valor diferente dos valores das regiões que o cerca. Pode ser valor alto de potência instalada com região de baixo valor (Alto-Baixo) ou valor baixo de potência com região com alto valor (Baixo-Alto) (ALMEIDA, 2012).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5.1 mostra a evolução da potência instalada das unidades geradoras por grupos de tensão da GD fotovoltaica, em MW, de 2014 a 2021. Os grupos A3 e AS tiveram apenas uma unidade geradora na cidade de Patos, inserida no sistema elétrico em 2021. O grupo B4 não teve crescimento por possuir apenas uma unidade geradora de 0,05 MW, em Monteiro, em 2019. Os grupos de tensão B1 e B3, como os primeiros no estado, apresentaram a maior potência instalada até o ano de 2021, refletindo seu pioneirismo, disseminação das instalações residenciais e comerciais de baixa tensão e adesão do mercado.

Tabela 5.10: Evolução da potência instalada das unidades geradoras por grupos de tensão da GD fotovoltaica, em MW, de 2014 a 2021.

Grupo	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A1							0,112	0,627
A3								0,104
A4			0,082	0,180	1,003	4,53	15,11	27,94
AS								0,005
B1	0,014	0,019	0,170	0,829	4,50	16,49	33,58	67,67
B2		0,002	0,010	0,108	0,73	2,07	4,58	9,70
B3	0,002	0,018	0,157	1,008	5,02	15,85	35,15	57,66
B4						0,05	0,05	0,05
Total	0,015	0,038	0,418	2,123	11,25	38,98	88,57	163,75

Fonte: ANEEL (2022).

Durante o período de 2015 a 2016, observou uma taxa de crescimento geométrico significativa, atingindo 199% a.a. para o grupo B1 (variando de 0,019 MW para 0,170) e 193% a.a. para o grupo B3 (variando de (0,018 para 0,157). Esse expressivo aumento esteve intrinsecamente relacionado à Resolução Normativa 687 de 2015, a qual estabeleceu o sistema de compensação de créditos entre filiais e suas matrizes, elevou o limite da minigeração para 5 MW e estendeu a validade dos créditos de energia elétrica para 60 meses. Adicionalmente, a normativa introduziu a possibilidade de geração compartilhada, proporcionando maior facilidade ao usuário da geração distribuída fotovoltaica.

Os grupos mais populares no estado, B1, B2 e B3, tiveram taxa de crescimento superior a 100% a.a. entre 2015 a 2018 como consequência da Resolução 687/2015 e à popularização do acesso da tecnologia no estado, além da isenção de ICMS sobre o valor compensado pela distribuidora na quantidade injetada na rede de distribuição previsto no

Convênio ICMS nº 16/2015 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) em 2015. O grupo A1 teve sua primeira instalação em 2020, de 0,112 MW, e teve aumento de 137% a.a. para 2021, tendo 0,627 MW de potência instalada, mostrando tendência de crescimento deste tipo de instalação. O A4 foi o grupo de alta tensão com maior potência instalada na Paraíba, em decorrência da sua maior facilidade para instalação, por ser a menor tensão dentro da categoria de alta tensão. Sua primeira instalação foi em 2016, de 0,082 MW, e em 2021 já possuía 27,94 MW instalados, distribuídos em 174 sistemas, em 42 cidades, com taxa de crescimento positiva ano a ano em todas as análises.

O uso da tecnologia fotovoltaica teve crescimento de 217% a.a. entre 2014 e 2021. A maior taxa de crescimento anual foi entre 2015 e 2016 (229%), ano em que a tecnologia começou a ter crescimento exponencial no Brasil, como mostra Iglesias e Vilaça (2022), variando de 0,038 MW para 0,418 MW. Isto foi reflexo de incentivos, regulamentações e programas governamentais favoráveis como o Programa Nacional de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD). Este programa foi criado pelo Ministério de Minas e Energia, em 2015, com o objetivo de estimular o financiamento de projetos de GD, com apoio à pesquisa e desenvolvimento, além de incentivos fiscais para empresas envolvidas neste setor (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

A Tabela 5.2 mostra o *ranking* das 20 cidades com maior potência instalada da GD fotovoltaica em 2021 e maior PIB per capita na Paraíba. Foi evidente que, dentre as 20 cidades analisadas no contexto do ranking de potência instalada, 50% delas estiveram inclusas nas 20 cidades de maior Produto Interno Bruto (PIB) per capita no estado da Paraíba. Essas cidades foram: João Pessoa, Campina Grande, Patos, Sousa, Cajazeiras, Cabedelo, Guarabira, Santa Rita, Conde e Mamanguape. Esta ligação entre o PIB per capita e o consumo de energia renovável encontra respaldo na pesquisa de Saidi e Mounir (2016), na qual eles mostraram que a elevada renda per capita é reconhecida como um impulsionador significativo para o uso de fontes renováveis de energia. Os autores mostraram que existe causalidade bidirecional e as energias renováveis foram componentes importantes para o crescimento econômico. Magazzino, Mele e Morelli (2021) mostraram que a energia renovável é um dos impulsionadores da economia brasileira, também esclarecem que diversos ensaios estabeleceram correlação positiva entre o desenvolvimento econômico e o consumo de energias renováveis no mundo.

A relação entre a potência instalada e o PIB per capita dos municípios da Paraíba possuem diversas características, envolvendo fatores econômicos e sociais, pois o desenvolvimento econômico facilita adoção de tecnologias sustentáveis e mais avançadas

pela sociedade. Esta relação se conectou aos investimentos iniciais necessários para instalação dos sistemas e as cidades com PIB per capita alto podem ter uma população com maior poder aquisitivo. Estas cidades tiveram mais acesso à educação de qualidade, gerando consciência ambiental e entendimento sobre a importância das energias limpas.

Tabela 5.11. Ranking das 20 cidades com maior potência instalada em 2021 e maior PIB per capita no estado da Paraíba.

Posição	Ranking da potência instalada - GD fotovoltaica	Potência instalada (kW)	Ranking do PIB per capita	PIB per capita
1 ^a	João Pessoa	25.865,40	Alhandra	111.427
2 ^a	Campina Grande	16.189,20	Cabedelo	39.870
3 ^a	Patos	14.465,83	Conde	35.696
4 ^a	Sousa	13.617,26	Mataraca	26.426
5 ^a	Cajazeiras	7.571,02	João Pessoa	25.402
6 ^a	Catolé do Rocha	7.189,78	Campina Grande	24.482
7 ^a	Cabedelo	6.098,79	Boa Vista	24.278
8 ^a	São Bento	4.913,09	São José do Sabugi	23.217
9 ^a	Pombal	3.591,23	Caaporã	21.649
10 ^a	Guarabira	2.888,18	Pitimbu	19.485
11 ^a	Santa Rita	2.691,80	Santa Luzia	19.092
12 ^a	Itaporanga	2.640,03	Pedras de Fogo	18.838
13 ^a	Conde	2.311,73	Santa Rita	18.673
14 ^a	Mamanguape	1.759,85	Cajazeiras	18.213
15 ^a	Bayeux	1.518,35	Sousa	17.982
16 ^a	São João do Rio do Peixe	1.497,45	Guarabira	17.860
17 ^a	Alagoinha	1.364,49	Patos	17.738
18 ^a	Lagoa Seca	1.296,22	Monteiro	17.272
19 ^a	Princesa Isabel	1.200,38	Alagoa Nova	15.850
20 ^a	São José de Piranhas	1.184,06	Mamanguape	15.320

Fonte: IBGE (2023).

Na Tabela 5.3 são mostrados os índices referentes à reta do diagrama de dispersão de Moran das regiões imediatas da Paraíba. Foi utilizada a matriz contiguidade com convenção de “rainha” para os anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021. Nos anos iniciais das instalações os valores apresentam-se negativos, mostrando dissimilaridade, pois as áreas próximas possuem valores diferentes tal qual Freitas et al. (2022). Isto foi reflexo da tecnologia ainda estar estabelecendo-se na Paraíba e ainda não possuir vizinhos similares. Por exemplo, em 2014, o grupo B1 registrou um índice de -0,182, quando apenas na região de João Pessoa possuía potência instalada. No entanto, a partir de 2016,

esse índice aumentou para 0,363, à medida que as regiões vizinhas se tornaram mais semelhantes devido à adesão dos sistemas em outras regiões, mostrando maior autocorrelação.

Tabela 5.12: I de Moran global da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da GD fotovoltaica dos grupos de tensão para regiões imediatas da Paraíba para matriz de contiguidade com convenção de “rainha”, nos anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021.

Grupo de tensão	2014	2016	2018	2020	2021
A1				-0,101	-0,107
A3					-0,127
A4		-0,101	-0,151	0,435	0,391
AS					-0,127
Alta tensão		-0,101	-0,151	0,435	0,395
B1	-0,182	0,363	0,366	0,718	0,659
B2		0	0,21	0,437	0,459
B3	-0,101	-0,223	0,294	0,672	0,584
B4				-0,024	-0,024
Baixa tensão	-0,197	0,397	0,412	0,72	0,665
Total	-0,197	0,284	0,372	0,675	0,652

Fonte: Os autores (2024).

Em 2014, apenas os grupos de tensão B1 e B3 possuíam instalações nas regiões de João Pessoa e Patos, então os valores do índice foram negativos, mostrando que as instalações semelhantes não estão na vizinhança, ou seja, não há nenhuma correlação espacial significativa, assim como foi encontrado por Wu et al. (2024). Em 2018, os grupos de baixa tensão apresentaram valores positivos por estarem com a tecnologia mais disseminada no estado e sendo agregada em várias regiões imediatas. A presença dos valores positivos foi mostrada por Fu et al. (2014) indicando a presença de padrões aglomerativos espaciais na área analisada. Os grupos de alta tensão, até 2018 mostraram-se negativos e Fotheringham et al. (2002) justificaram como dissimilaridade entre a localização da variável e o valor da variável. Isto ocorreu em consequência dos grupos de alta tensão não serem comuns como os grupos de baixa, por fatores burocráticos e técnicos juntos à distribuidora.

O índice de global de Moran para os grupos de alta tensão foi positivo apenas na década de 2020, apresentada por Fotheringham et al. (2002) como similaridade, onde os valores altos tendem a agrupar-se juntos, circundados de valores altos nas regiões vizinhas, o mesmo acontece para os valores baixos. Isto foi reflexo da popularização do

uso dos sistemas no estado, permitindo que os vizinhos fossem semelhantes como consequência da elevada busca à geração limpa e independência energética como consequência do valor alto da energia elétrica. A ANEEL lançou, em 2020, a bandeira tarifária roxa para suprir o uso das termoeletricas, como consequência da escassez hídrica, cobrando R\$ 14,20 extra por 100 kWh consumido.

A análise dos índices para os grupos de baixa tensão e instalações totais foi semelhante, pois os grupos de alta tensão tiveram baixa potência instalada per capita e baixa relevância na análise total, também possuíram sistemas instalados em apenas 13 das 15 regiões imediatas da Paraíba. O grupo B1 teve alto valor por estar presente em todas as regiões imediatas da Paraíba e indicou que a variável tem valores altos próximos a valores altos e/ou valores baixos próximos a valores baixos. Os índices positivos indicaram que as instalações do tipo B1 tiveram autocorrelação espacial significativa e o agrupamento espacial das regiões imediatas teve grau semelhante, tal qual foi observado por Lv, Liu e Xu (2022). Já os grupos que estiveram presentes em apenas uma região, A1, A3, AS e B4, apresentam autocorrelação negativa, em decorrência de não possuir similaridade com os vizinhos, já que eles não tinham instalação. Os grupos B1 e B2, os quais são mais predominantes no estado, juntamente com as instalações de baixa tensão e o total de instalações, apresentaram um índice global de Moran superior a 0,6. Isso evidencia uma forte autocorrelação espacial, refletindo-se em padrões de agrupamento espacial, assim como Luo et al. (2024) e Zha et al. (2024)

Na Tabela 5.4, são mostrados os índices da reta do diagrama de dispersão do I de Moran Global das cidades da Paraíba. Foi considerado a matriz de contiguidade “rainha” para os anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021. A análise municipal foi análoga à região imediata em que os valores negativos se apresentaram nas mesmas situações da análise anterior, assim como os valores positivos. No entanto, os valores mostram-se inferiores, em decorrência da existência de 223 cidades da Paraíba, aumentando a quantidade de vizinhos e, por consequência, diminuindo a probabilidade de haver similaridade. Observou que os valores começaram negativos em 2014, indicando uma dispersão dos dados, conforme indicado por Almeida (2012). Em contraste com a análise das regiões imediatas, onde, dos 223 municípios na Paraíba, apenas 42 têm instalações de geração distribuída fotovoltaica de alta tensão, resultando em uma autocorrelação negativa na maioria dos anos, sendo positiva apenas em 2021. De maneira similar, os grupos de baixa tensão e o total de instalações tiveram análises comparáveis, dado que a baixa tensão predomina a análise. A partir de 2018, valores positivos foram observados, em

decorrência do aumento das instalações e de sua influência mútua. Almeida (2012) demonstrou que essa autocorrelação positiva evidenciou uma concentração de valores similares de potência instalada per capita nos municípios.

Tabela 5.13: I de Moran global da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da GD fotovoltaica dos grupos de tensão para municípios da Paraíba para matriz de contiguidade com convenção de “rainha”, nos anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021.

Grupo de tensão	2014	2016	2018	2020	2021
A1				-0,004	-0,022
A3					-0,007
A4		-0,006	-0,017	-0,007	0,009
AS					-0,007
Alta tensão		-0,017	-0,007	0,016	0,012
B1	-0,006	-0,016	0,344	0,326	0,339
B2		-0,003	0,030	0,229	0,208
B3	-0,006	-0,011	0,221	0,169	0,171
B4				-0,006	-0,006
Baixa tensão	-0,009	0,062	0,33	0,313	0,322
Total	-0,009	0,069	0,319	0,275	0,271

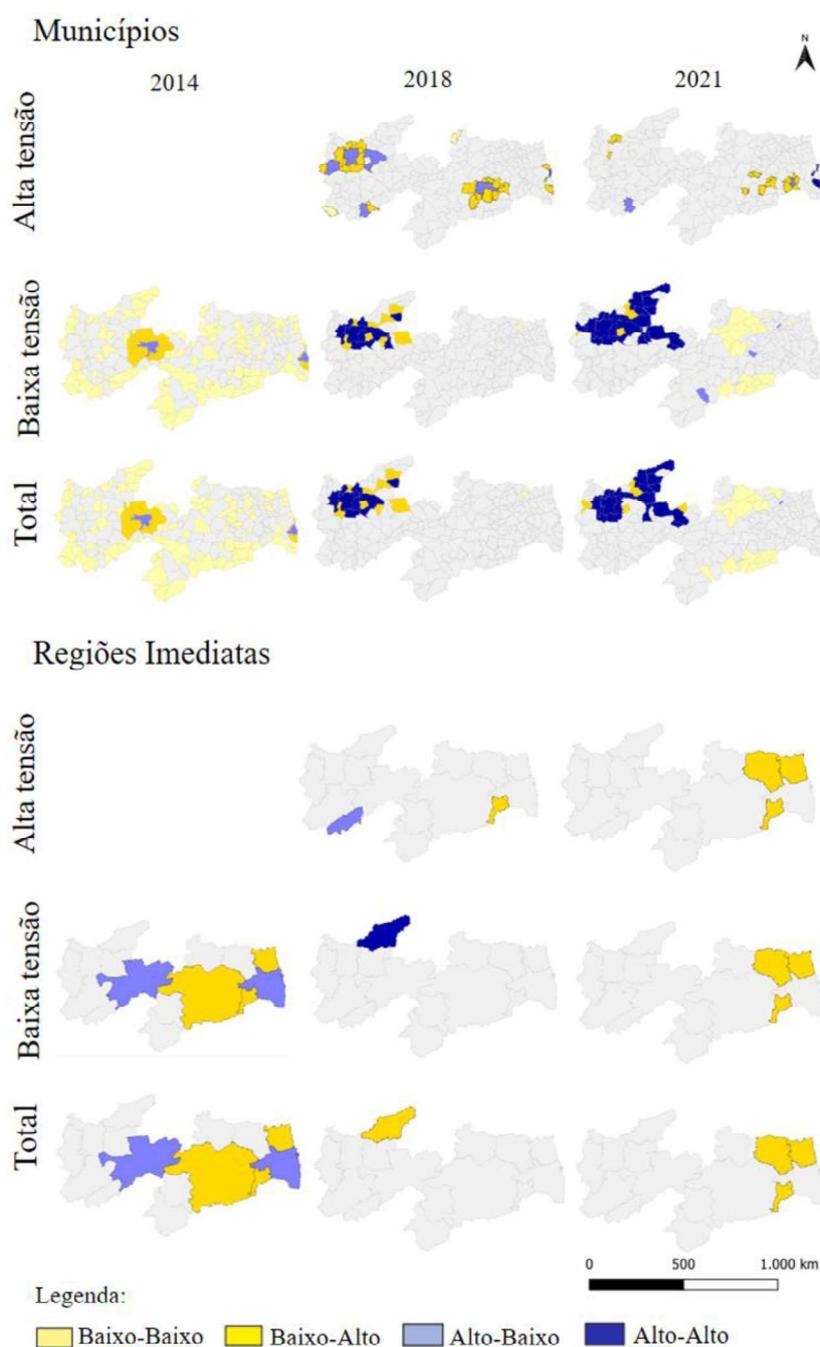
Fonte: Os autores (2024).

O menor índice de autocorrelação esteve em 2014 (-0,009) para a junção dos grupos de baixa tensão e instalações totais, que são a mesma potência per capita instalada, em decorrência de não haver instalações de alta tensão. Isto ocorreu, pois o ano de 2014 foi o ano pioneiro do uso desta tecnologia e havia instalação apenas nas cidades de João Pessoa e Patos. O maior valor esteve presente no ano de 2021, no grupo B1 (0,339) pela presença do grupo em 211 cidades da Paraíba, em que a cultura de autossuficiência energética e redução da dependência da rede elétrica convencional têm sido disseminada em todo país. O segundo maior valor esteve presente na análise da baixa tensão, por sua presença em 217 cidades da Paraíba como reflexo do aumento na disponibilidade de empresas e profissionais especializados na instalação e manutenção de sistemas. O valor inferior da análise municipal, quando comparada às regiões imediatas, ocorreu pela alta quantidade de cidades existentes na Paraíba, proporcionando baixa quantidade de vizinhos com potência per capita similar. Já na análise por regiões imediatas, por serem apenas 15, teve maior possibilidade de ter vizinhos com potência per capita similar.

Na Figura 5.4 apresenta o I de Moran local, para matriz “rainha” e anos de 2014, 2018 e 2021, com os grupos de alta tensão, baixa tensão e a junção de todos grupos, para municípios e regiões imediatas da Paraíba. A maioria das cidades apresentaram-se com

agrupamento espacial estatisticamente insignificante durante o período de estudo, tal qual Chen et al. (2018), nestas regiões não existiram padrões espaciais fortes, sem correlação espacial significativa com seus vizinhos.

Figura 5.4 Distribuição espacial do I de Moran Local da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da geração distribuída fotovoltaica para municípios e regiões imediatas da Paraíba, dos grupos de alta tensão, baixa tensão e instalações totais nos anos de 2014, 2018 e 2021.



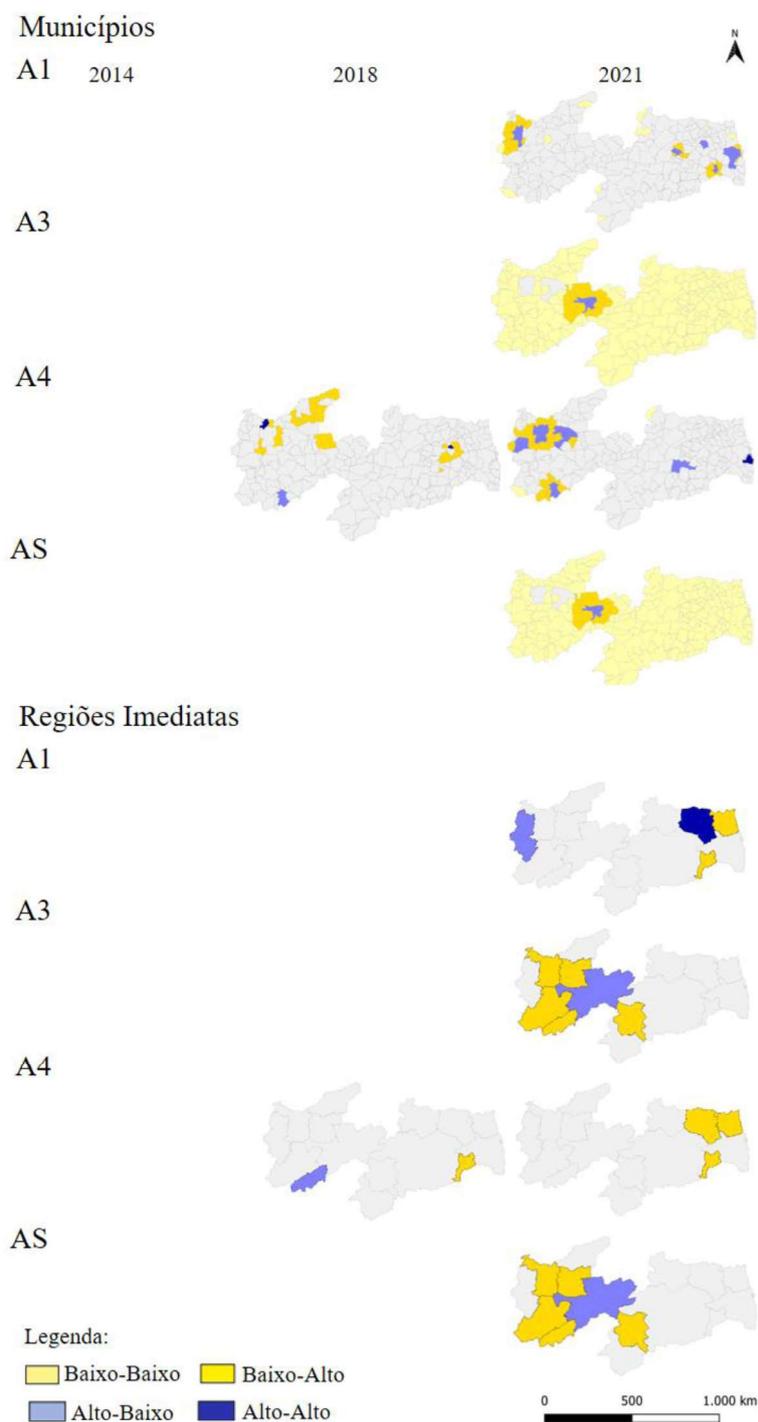
Fonte: Os autores (2024).

Em 2014, para os grupos de baixa tensão, das regiões imediatas, formou-se uma aglomeração espacial do tipo Baixo-Alta que é formada pelas regiões de Campina Grande e Sumé. Na ótica municipal, notou-se um *cluster* formado por Patos, no centro, com características Alto-Baixo e São José dos Espinharas, Malta, Santa Terezinha e São Mamede circundando com características Baixo-Alto. Este *cluster* foi reflexo da alta potência instalada no semiárido da Paraíba em junção à baixa população desta região, isto ocorreu pelo grande potencial energético de energia solar nesta região pela alta taxa de irradiação solar e grande viabilidade econômica do projeto (CUNHA; PONTES, 2022).

Em 2018 para os grupos de alta tensão nas regiões imediatas notou-se a formação de um *cluster* do tipo Alto-Baixo, pelas regiões imediatas de Itaporanga e Patos em decorrência da formação Baixo-Baixo da região de Campina Grande. Já na análise municipal, observou um *cluster* Alto-Baixo e Baixo Alto formados pelas cidades que compõem as regiões imediatas de Cajazeiras, Sousa e Pombal. Notou o início de dois *clusters* distintos que se intensificaram em 2021, um Baixo-Baixo próximo à Campina Grande e um Alto-Alto próximo a Patos. Isto foi visto como uma polarização do mapa em que a região do semiárido da Paraíba recebe destaque por ter alta concentração de municípios e vizinhos com alto índice do uso da tecnologia. A alta concentração foi consequência da potência analisada ter conexão direta com a radiação solar da região que tem valores típicos altos e eficientes no semiárido Paraíba, em comparação com outras regiões da Paraíba (LIMA et al., 2017). A análise abrangente total dos grupos assemelhou-se àquela realizada nos grupos de baixa tensão devido à observação de que a potência instalada per capita para a alta tensão foi significativamente inferior em comparação com os grupos de baixa tensão.

Na Figura 5.5 mostra o I de Moran local para potência per capita instalada da GD fotovoltaica das regiões imediatas e municípios da Paraíba para matriz “rainha” para os anos de 2014, 2018 e 2021 para os grupos de tensão de alta tensão. Na análise municipal do grupo A1, pode-se identificar um *cluster* centrado em São João do Rio do Peixe com característica Alto-Baixo, circundado por Uiraúna, Poço de José de Moura, Triunfo e Santa Helena com características Baixo-Alto, na região do semiárido da Paraíba que é reflexo da tendência de crescimento do grupo A1 no estado. Na análise municipal do grupo A3 e AS foi possível ver um pequeno *cluster* centrado em Patos, pois as instalações existentes foram nesta cidade, os vizinhos foram mostrados como Baixo-Alto por não possuírem instalação, assim como as demais cidades, classificadas como Baixo-Baixo que não possuíram esta potência instalada.

Figura 5.5: Distribuição espacial do I de Moran Local da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da geração distribuída fotovoltaica nos municípios e regiões imediatas da Paraíba os grupos de alta tensão nos anos de 2014, 2018 e 2021.



Fonte: Os autores (2024).

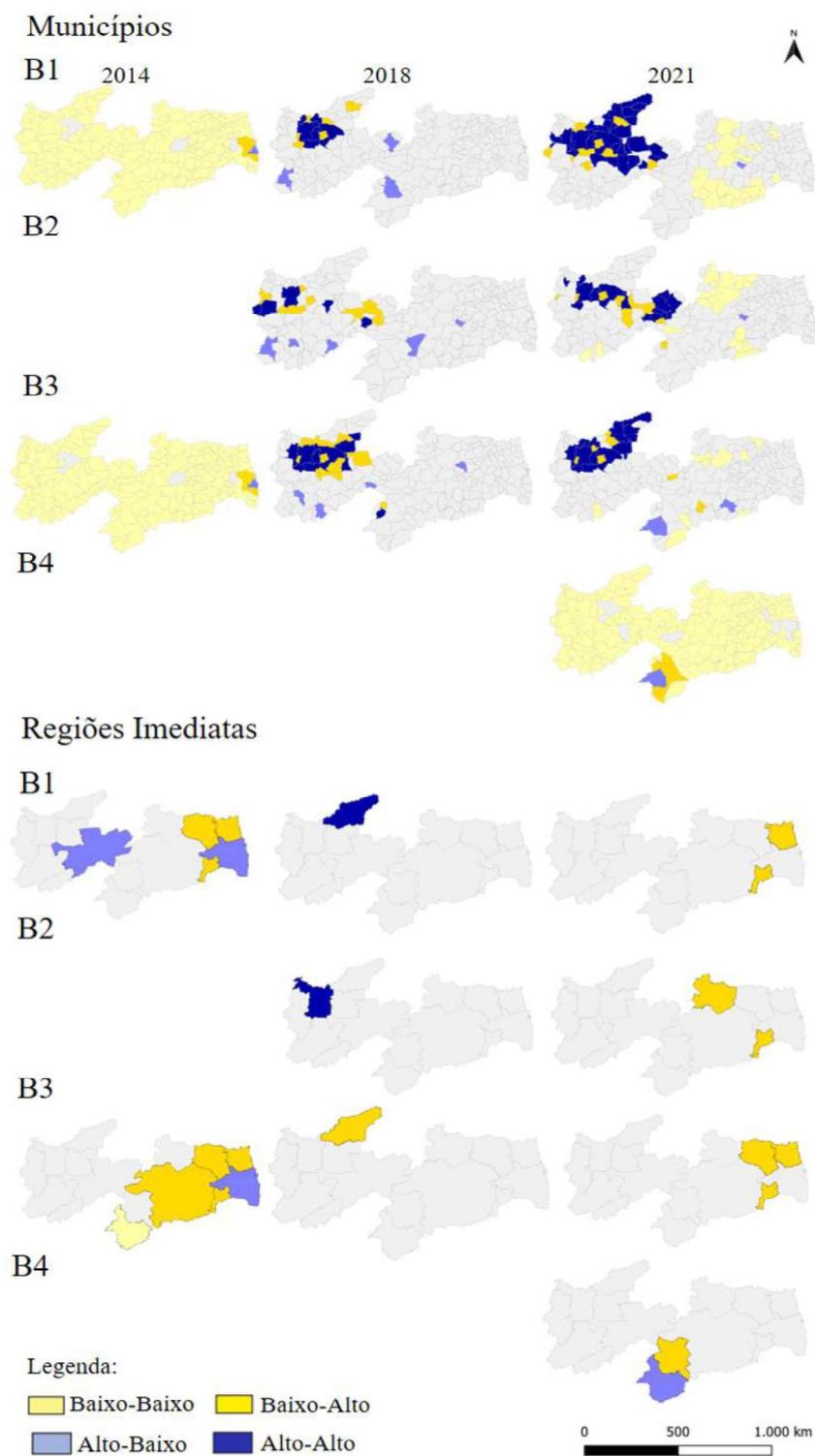
Estes grupos de tensão não são populares no estado como reflexo das dificuldades técnicas e burocráticas para instalação, principalmente do grupo AS que além de ser de

alta tensão, é subterrâneo. O grupo A3 nas regiões imediatas, identificou um *cluster* Baixo-Alto formado pelas regiões imediatas de Pombal, Sousa, Itaporanga e Princesa Isabel. O A4 foi o grupo de alta tensão mais popular em 2021, nas regiões imediatas teve um aglomerado espacial do tipo Baixo-Alto composto pelas regiões Patos e Itaporanga. Na análise municipal, em 2018, houve *clusters* detectados formados por Princesa Isabel que tiveram características Alto-Baixo e as cidades vizinhas, Teixeira, Nova Olinda, Manaíra, Curral Velho e São José de Princesa caracterizados como Baixo-Alto. Outro *cluster* foi identificado por municípios que estão nas regiões imediatas de Sousa e Cajazeiras. A maior quantidade de aglomerados espaciais neste grupo de tensão, dentre os grupos de alta tensão, sendo reflexo da menor tensão elétrica em sua instalação e necessitar de equipamentos com menores parâmetros elétricos, como transformadores tensão.

Na Figura 5.6 é mostrada a distribuição espacial do I de Moran local da potência instalada per capita da geração distribuída fotovoltaica nos municípios e regiões imediatas da Paraíba para os grupos de baixa tensão nos anos de 2014, 2018 e 2021. Na análise municipal do grupo B1, em 2014, apenas João Pessoa mostrou relevância, por sua alta potência instalada e ter sido um dos municípios pioneiros do uso desta fonte. O mesmo ocorreu para o primeiro ano de instalação do grupo B3 e o B4, em decorrência de ser o primeiro ano da instalação e ser a porta de entrada para as demais cidades e grupos de tensão, em anos posteriores. Em 2018, o início de um *cluster* do tipo Alto-Alto na região semiárida da Paraíba e em 2021 foi possível ver o aumento deste aglomerado espacial e a tendência à polarização, em que a região de Patos e Sousa-Cajazeiras tiveram maior concentração da potência instalada por habitante.

No grupo B3, em 2021, observou dois *clusters* distintos, o primeiro foi do tipo Baixo-Baixo com Campina Grande, Guarabira e João Pessoa e o segundo foi formado por Catolé do Rocha-São Bento sendo Baixo-Alto e Pombal e Sousa sendo Alto-Alto. Na análise municipal do grupo B3 notou semelhança com o grupo B1, com diferença apenas do tamanho do *cluster*, sendo maior que o do B1, em 2018 e menor que o B1 em 2021. Na análise regional, percebeu a presença de aglomerados espaciais do tipo Baixo-Alto com as regiões imediatas de Campina Grande, Guarabira e Mamanguape, João Pessoa apresenta-se com características Alto-Baixo. O grupo B2 apresenta *cluster* Alto-Alto com municípios, em 2021, que compõem cidades das regiões de Pombal e Patos e na análise regional teve *cluster* do tipo Alto-Alto com as regiões imediatas de Catolé do Rocha-São Bento, Sousa e Pombal.

Figura 5.6: Distribuição espacial do I de Moran Local da potência instalada per capita (quilowatt – kW) da geração distribuída fotovoltaica nos municípios e regiões imediatas da Paraíba para os grupos de baixa tensão nos anos de 2014, 2018 e 2021.



Fonte: Os autores (2024).

Os *clusters* do tipo Alto-Alto dos grupos B1 e B3, estão concentrados em áreas semelhantes, evidenciando o destaque dos municípios da região de Patos e Sousa-Cajazeiras devido à sua alta capacidade instalada e baixa densidade populacional. A formação desse agrupamento também se reflete no agrupamento formado pelas instalações totais, demonstrando a importância e popularidade no mercado dos grupos B1 e B3, uma vez que são de baixa tensão e requerem menos recursos técnicos e burocráticos para sua implementação. Além disso, sendo predominantemente instalações residenciais e comerciais, refletem uma demanda maior em comparação com as instalações rurais (B2).

5.4 CONCLUSÃO

Este estudo analisou a distribuição e dependência espaço-temporal da potência instalada per capita da GD fotovoltaica na Paraíba de 2014 a 2021, destacando a dinâmica de sistemas instalados e a evolução do uso da tecnologia no estado. A análise da situação, segmentada por grupos de tensão, revelou que os grupos B1 e B3 assumem uma posição de destaque na capacidade instalada no estado.

No índice de dispersão de Moran para regiões imediatas e municípios da Paraíba houve comportamento semelhante, pois iniciaram com valores negativos por ainda não serem uma tecnologia tão disseminada. Nos anos posteriores, os valores foram mostrando que a autocorrelação era positiva, pois a tecnologia foi se estabelecendo no estado e na medida que os vizinhos aumentam, o índice reduzia. Quanto ao LISA, para os grupos de alta tensão, foi possível ver que o uso da tecnologia ainda está se desenvolvendo no estado, como consequência das burocracias técnicas dessas instalações. O grupo A4, dentre os grupos A, possuiu maior quantidade de *clusters* no estado, como reflexo da sua baixa tensão, em comparação aos demais. Já os grupos de baixa tensão, pode-se ver polarização dos *clusters*, principalmente nos grupos de tensão B1, B2 e B3, em que o semiárido da Paraíba possui grande concentração de cidades do tipo Alto-Alto.

O uso do AEDE para o setor de GD na Paraíba representou uma abordagem inovadora e evidenciou uma adaptação eficaz. Este artigo desempenha um papel relevante na validação da aplicação desta metodologia a esse objeto de estudo específico. A compreensão do padrão espacial da GD fotovoltaica, conforme apresentada, não apenas pode orientar os tomadores de decisão no desenvolvimento de políticas públicas, mas também ofereceu uma base valiosa para investigações futuras envolvendo fontes energéticas distintas e outras regiões do país.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, A. N., JING, W., NAZIR, M. S., JIANG, M., & TAO, H. Socio-economic impacts of solar energy technologies for sustainable green energy: A review. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-38, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração Distribuída. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida. Acesso em: 19 abr. 2022.

AFTAB, S., IQBAL, M. Z., HAIDER, Z., IQBAL, M. W., NAZIR, G., & SHEHZAD, M. A Bulk photovoltaic effect in 2D materials for solar-power harvesting. **Advanced Optical Materials**, v. 10, n. 23, p. 2201288, 2022.

ALMEIDA, E. Econometria espacial. Campinas–SP. Alínea, 2012.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.

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

ANSELIN, L. Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, n. 3, p. 705-710, 2001.

ANSELIN, L., & BERA, A. K Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. **Statistics Textbooks And Monographs**, v. 155, p. 237-290, 1998.

ANSELIN, L., & CHO, W. K. T. Spatial effects and ecological inference. **Political Analysis**, v. 10, n. 3, p. 276-297, 2002.

BRUNET, C., SAVADOGO, O., BAPTISTE, P., BOUCHARD, M. A., CHOLEZ, C., ROSEI, F., MERVEILLE, N. Does solar energy reduce poverty or increase energy security? A comparative analysis of sustainability impacts of on-grid power plants in Burkina Faso, Madagascar, Morocco, Rwanda, Senegal and South Africa. **Energy Research & Social Science**, v. 87, p. 102212, 2022.

CHEN, J., XU, C., LI, K., & SONG, M. A gravity model and exploratory spatial data analysis of prefecture-scale pollutant and CO₂ emissions in China. **Ecological Indicators**, v. 90, p. 554-563, 2018.

CHEN, Y; MIAO, Q; ZHOU, Q. Spatiotemporal Differentiation and Driving Force Analysis of the High-Quality Development of Urban Agglomerations along the Yellow River Basin. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 4, p. 2484, 2022.

CLIFF, A. D.; HAGGETT, P.; ORD, J. K.; VERSEY, G. R. Spatial Diffusion: A Historical Geography of Epidemics in an Island Community. Cambridge University Press, 1981.

COELHO JUNIOR, L. M.; MARTINS, K. L. C.; SILVA; M. V. B. Spatial convergence of the gross value of production of firewood in the mesoregions of the Brazilian Northeast. **Revista Árvore**, v. 42, 2018.

COELHO JUNIOR, L. M., SANTOS JUNIOR, E. P., NUNES, A. M. M., DE SOUZA, Á. N., BORGES, L. A. C., & SIMIONI, F. J.. Concentration and clusters of black liquor

thermoelectric plants in Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 12, p. 2122-2129, 2021.

CUNHA, D. P. S.; PONTES, K. V. Usina de dessalinização integrada à energia solar térmica: um estudo de caso para o semi-árido brasileiro. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129943, 2022. See Mores

DOU, Y., LUO, X., DONG, L., WU, C., LIANG, H., & REN, J.. An empirical study on transit-oriented low-carbon urban land use planning: Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) on Shanghai, China. **Habitat International**, v. 53, p. 379-389, 2016.

DUNN, L. N., SOHN, M. D., LACOMMARE, K. H., & ETO, J. H. 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.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. Dados e estatísticas. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/painel-de-dados-de-micro-e-minigeracao-distribuida-pdgd->>. Acesso em: 14 jul. 2022.

FERREIRA, M. M., SANTOS, J. A., DA SILVA, L. R., ABRAHAO, R., GOMES, F. D. S. V., & BRAZ, H. D. M. A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind and hybrid generation in Northeast Brazil. **Renewable Energy**, v. 217, p. 119182, 2023.

FREITAS, W. W., DE SOUZA, R. M., AMARAL, G. J., & DE BASTIANI, F. 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.

FU, W. J., JIANG, P. K., ZHOU, G. M., & ZHAO, K. L.. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. **Biogeosciences**, v. 11, n. 8, p. 2401-2409, 2014.

GEBARA, C. H.; LAURENT, A. National SDG-7 performance assessment to support achieving sustainable energy for all within planetary limits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 112934, 2023.

IGLESIAS, C., & VILAÇA, P. On the regulation of solar distributed generation in Brazil: A look at both sides. **Energy Policy**, v. 167, p. 113091, 2022.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 11 jul. 2022.

IEA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

MALIK, K., ROBERTSON, C., ROBERTS, S. A., REMMEL, T. K., & LONG, J. A. Computer vision models for comparing spatial patterns: understanding spatial scale, **International Journal of Geographical Information Science**, 37:1, 1-35, (2023). DOI: 10.1080/13658816.2022.2103562

KUMARI, M; SARMA, K; SHARMA, R. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of land surface temperature in relation to land use/cover around a thermal power plant in Singrauli district, Madhya Pradesh, India. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 15, p. 100239, 2019.

- LE GALLO, J; ERTUR, C. Exploratory spatial data analysis of the distribution of regional per capita GDP in Europe, 1980–1995. **Papers in Regional Science**, v. 82, n. 2, p. 175-201, 2003.
- LI, D; CAI, W. Optimal configuration of photovoltaic energy storage capacity for large power users. **Energy Reports**, v. 7, p. 468-478, 2021.
- LI, L., TANG, H., LEI, J., & SONG, X. Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park. **Ecological Indicators**, v. 137, p. 108727, 2022.
- LI, L., FAN, Z., FENG, W., YUXIN, C., & KEYU, Q. Coupling coordination degree spatial analysis and driving factor between socio-economic and eco-environment in northern China. **Ecological Indicators**, v. 135, p. 108555, 2022.
- LIMA, L. C.; ARAÚJO, F. L; LIMA, M. F. H. B. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 79-85, 2017.
- LUO, H., WANG, C., LI, C., MENG, X., YANG, X., & TAN, Q. Multi-scale carbon emission characterization and prediction based on land use and interpretable machine learning model: A case study of the Yangtze River Delta Region, China. **Applied Energy**, v. 360, p. 122819, 2024.
- LV, Z; LIU, W; XU, T. Evaluating the impact of information and communication technology on renewable energy consumption: A spatial econometric approach. **Renewable Energy**, v. 189, p. 1-12, 2022.
- MADDISON, A. The World Economy. **OECD Publishing**, Paris, 2007.
- MAGAZZINO, C; MELE, M; MORELLI, G. The relationship between renewable energy and economic growth in a time of Covid-19: a machine learning experiment on the Brazilian economy. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1285, 2021.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de; RÜTHER, R. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José Dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.
- MATHUR, M. Spatial autocorrelation analysis in plant population: An overview. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 7, n. 1, p. 501-513, 2015.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **ProGD**: Confirma o Relatório Final do Grupo de Trabalho. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/progd-confirma-o-relatorio-final-do-grupo-de-trabal-1/pop_up?fbclid=IwAR0zsVUk5YwjR6A0q1dYqr7jqQvqhWfVzF9JboN9_wUr-Zu0IKmRcnNV9oY. Acesso em: 01 dez. 2023.
- MONTEIRO, A. M. V., CÂMARA, G., CARVALHO, M. S., & DRUCK, S. Análise espacial e geoprocessamento. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, p. 21-54, 2004.
- O'SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. Putting Maps Together – Map Overlay. In: **Geographic Information Analysis**. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 2010. p. 315–340.
- PARAÍBA. Secretaria De Planejamento, Orçamento e Gestão. **Produto interno bruto dos municípios do estado da Paraíba**: Resultados 2020. Disponível em:

- https://paraiba.pb.gov.br/diretas/secretaria-de-planejamento-orcamento-e-gestao/arquivos/pib-municipios/produto-interno-bruto-dos-municipios-do-estado-da-paraiba_resultados-2020.pdf. Acesso em: 01 dez. 2023.
- SAIDI, K; MBAREK, M. Ben. Nuclear energy, renewable energy, CO2 emissions, and economic growth for nine developed countries: Evidence from panel Granger causality tests. **Progress in Nuclear Energy**, v. 88, p. 364-374, 2016.
- SANTOS JÚNIOR, E. P., MARTINS, K. D. L. D. C., DA SILVA, M. V. B., MAURÍCIO, C. F. B., MENEZES, R. S. C., COELHO JUNIOR, L. M.. Forest Bioelectricity in Brazil: Distribution and Spatial-Time Dependence. **IEEE Access**, v. 10, p. 132822-132835, 2022.
- SILVA, N. C. N., OLIVEIRA, M. D., SANTOS, G. D., & BRAGA, A. Análise de dados de área aplicada a dois indicadores econômicos de mesorregiões do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 29, n. 3, p. 369-395, 2011.
- STEVOVIC, I., MIRJANIC, D., & PETROVIC, N Integration of solar energy by nature-inspired optimization in the context of circular economy. **Energy**, v. 235, p. 121297, 2021.
- SYMANZIK, J. Exploratory spatial data analysis. In: **Handbook of Regional Science**. Springer, 2013. p. 1295-2310.
- TSAI, P. J., PERNG, C. H. Spatial autocorrelation analysis of 13 leading malignant neoplasms in Taiwan: a comparison between the 1995-1998 and 2005-2008 periods. **Health**, v. 3, n. 12, p. 712, 2011.
- WANG, K., ZHAO, X., PENG, B., & ZENG, Y. Spatio-temporal pattern and driving factors of municipal solid waste generation in China: New evidence from exploratory spatial data analysis and dynamic spatial models. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 121794, 2020.
- WU, X; LIU, H; LIU, W. Exploring the spatiotemporal evolution dynamic and influencing factor of green ecology transition for megacities: A case study of Chengdu, China. **Ecological Indicators**, v. 158, p. 111285, 2024.
- YANG, Q., ZHANG, H., BAI, W., LIU, W., 2018. County-Scale migration attractiveness and factors analysis. 26th **International Conference on Geoinformatics** IEEE 1–7.
- ZHA, F., LU, L., WANG, R., ZHANG, S., CAO, S., BAQA, M. F., CHEN, F. Understanding fine-scale heat health risks and the role of green infrastructure based on remote sensing and socioeconomic data in the megacity of Beijing, China. **Ecological Indicators**, v. 160, p. 111847, 2024.
- ZHANG, X., GENG, Y., TONG, Y. W., KUA, H. W., TIAN, X., WU, R., ZHAO, X., CHIU, A. S. 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.

6 ARTIGO 5 – DINÂMICA REGIONAL VIA CADEIAS ESPACIAIS DE MARKOV PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA PARAÍBA - BRASIL

RESUMO

Este artigo analisou a dinâmica regional por meio das cadeias espaciais de Markov para geração distribuída fotovoltaica na Paraíba, Brasil. Os dados de potência instalada, em kW, estão disponíveis na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no período de 2014 a 2021, e a população das cidades para 2010 e 2021 foram oriundos do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística - IBGE. Usou as Cadeias Espaciais de Markov para avaliar a influência da vizinhança na potência instalada per capita, conectando abordagens clássicas de cadeias de Markov com uma visão geográfica. Os resultados mostraram a evolução da tecnologia fotovoltaica per capita anual da Paraíba que teve 0,0403 kW/hab em 2021, e as cidades de Patos (0,0741 kW/hab), Catolé do Rocha (0,0737 kW/hab) e Areia de Baraúnas (0,0683 kW/hab) se destacaram entre os municípios paraibanos. Na região do semiárido da Paraíba, os municípios tiveram melhores desempenhos em relação aos demais em virtude das condições edafoclimáticas e alta potência instalada per capita. Uma boa vizinhança municipal duplica a probabilidade de melhorar as condições de estado, enquanto uma má vizinhança eleva a probabilidade de piorar de estado em média de 20% para 50%. Essa dinâmica regional da geração distribuída fotovoltaica mostra os arranjos produtivos locais e onde as localidades são mais atraentes em termos de geração de emprego e renda.

Palavras-chave: Energia limpa, Transição energética, Economia de baixo carbono.

**ARTICLE 5 – REGIONAL DYNAMICS VIA MARKOV SPATIAL CHAINS
FOR DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC GENERATION IN PARAÍBA –
BRAZIL**

ABSTRACT

This article analyzed regional dynamics through spatial Markov chains for distributed photovoltaic generation in Paraíba, Brazil. Installed power data, in kW, are available from the National Electric Energy Agency (ANEEL), for the period from 2014 to 2021, and city population data for 2010 and 2021 were obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics - IBGE. Spatial Markov Chains were used to evaluate the influence of neighborhood on installed power per capita, connecting classical Markov chain approaches with a geographic perspective. The results showed the evolution of annual per capita photovoltaic technology in Paraíba, which was 0.0403 kW/inhabitant in 2021. The cities of Patos (0.0741 kW/inhabitant), Catolé do Rocha (0.0737 kW/inhabitant), and Areia de Baraúnas (0.0683 kW/inhabitant) stood out among the municipalities in Paraíba. In the semi-arid region of Paraíba, the municipalities had better performances compared to others due to edaphoclimatic conditions and high installed power per capita. A good municipal neighborhood doubles the probability of improving state conditions, while a bad neighborhood increases the probability of worsening state conditions on average from 20% to 50%. This regional dynamic of distributed photovoltaic generation influences local production arrangements, making these locations more attractive in terms of job and income generation.

Keywords: Clean energy, Energy transition, Low carbon economy.

6.1 INTRODUÇÃO

Os problemas climáticos em decorrência da liberação de dióxido de carbono não capturado e não absorvido estão cada vez mais graves e ameaçam as atividades socioeconômicas e a qualidade de vida humana (LEE et al., 2023). A tecnologia solar fotovoltaica ganhou força por sua prontidão de contribuir na redução da emissão de dióxido de carbono, ser econômica e sem poluentes na operação (NDWALI et al., 2020). Também, aparece como oportunidade para atingir os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) por ser uma energia mais limpa, segura e sustentável (PRAVALIE et al., 2019).

A International Renewable Energy Agency - IRENA (2023) mostrou que em 2022 a capacidade instalada da energia solar fotovoltaica mundial foi de aproximadamente 880 GW. A China lidera o *ranking* mundial de capacidade com 392 GW, seguida dos Estados Unidos (111 GW) e Japão (83 GW) e o Brasil esteve na oitava posição com 24 GW. Apesar China da sua liderança global na geração fotovoltaica, ainda é insuficiente em comparação ao seu potencial e desigualdade regional, e ainda possui dependência energética dos combustíveis fósseis (LI; HUANG, 2020).

No Brasil, até o fim dos anos 2000, a energia solar fotovoltaica era formada por instalações pequenas e rurais, sem conexão (*off-grid*) com o Sistema Interligado Nacional (SIN). Este cenário mudou em decorrência da regulação da Geração Distribuída (GD) com a Resolução Normativa 482/2012 e Resolução Normativa 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. A capacidade instalada da GD fotovoltaica no Brasil em 2012 era 678 kW, com 13 unidades geradoras, e chegou 2021 a aproximadamente 9 GW, com 803 mil unidades geradoras (ANEEL, 2012; 2015; 2022; DOYLE et al., 2021). Em 2021, Minas Gerais foi o primeiro do *ranking* estadual em GD com 1,5 GW e mais de 130 mil unidades geradoras, seguido de São Paulo com 1,15 GW e Rio Grande do Sul com 1,06 GW. No Nordeste do Brasil, a Bahia teve a maior capacidade instalada, com aproximadamente 306 MW, seguido do Ceará com 303 MW e Pernambuco com 272 MW. A Paraíba chegou a aproximadamente 150 MW que eram gerados por mais de 11 mil sistemas e ocupando a sétima posição do Nordeste e décima oitava do Brasil (ANEEL, 2022; EPE, 2022).

A energia solar fotovoltaica vem ganhando aceitação no mercado em virtude da acessibilidade, tecnologia disponível e condições edafoclimáticas favoráveis. Este uso tecnologia energética varia de acordo com a localização geográfica, pois há desigualdade regional, diversidade cultural e divergência na aceitação tecnológica (BODIS et al., 2019;

JONG et al., 2017). Para mapear e estimar a distribuição de uma tecnologia ao longo do tempo, as cadeias de Markov aparecem para descrever a transição dos estados de eficiência tecnológica, considerando apenas o estado imediatamente anterior. Já o modelo espacial da cadeia de Markov (SMC, em inglês) determina a propensão de mudanças no tempo condicionadas ao cenário espacial, sendo uma ferramenta de rastreamento da evolução temporal da distribuição espacial (AGOVINO et al., 2019; CLARK; REY, 2017; REY; YE, 2010).

Rey (2001) buscou conectar as abordagens convencionais com uma visão geográfica e ter uma análise mais profunda da dinâmica transicional (HE et al., 2017). Esta análise atribui o contexto espacial para variáveis de estudo para que as transições temporais se relacionem com as condições da vizinhança, permitindo relacionar a evolução da distribuição de energia com o contexto regional. A SMC promove um estudo simultâneo da performance espaço-temporal do processo e como os locais próximos têm influência uns aos outros (AGOVINO et al., 2019). Este tipo de cadeia de Markov permite entender o efeito de transbordamento espacial, criando um elo entre o processo de eventos. Além de agir em fenômenos geográficos para discretizar as variáveis e calcular a distribuição em vários tipos de probabilidades (CHEN et al., 2021).

Recentemente, houve um incremento do uso da cadeia espacial de Markov na literatura internacional, dos quais Clark e Rey (2017) estudaram a dinâmica temporal dos veículos da Grã-Bretanha realizando a exploração da estabilidade das taxas de propriedade. Agovino et al. (2019) mostraram os efeitos de proximidade nas taxas de obesidade nos Estados Unidos. Lv et al. (2021) mostraram a tendência de desenvolvimento de finanças verdes na China. Já Liao e Wei (2012) abordaram com a SMC a dinâmica espaço-temporal das desigualdades regionais em Guangdong, na China. No Brasil, Schettini et al. (2011) utilizaram a Cadeia Espacial de Markov para analisar a competitividade regional da manufatura de 2000 a 2006.

Em busca de compreender os efeitos espaço-temporais da distribuição regional da potência inserida per capita da GD fotovoltaica nos municípios, este artigo analisou a dinâmica regional por meio das cadeias espaciais de Markov para geração distribuída fotovoltaica na Paraíba, Brasil. Esta abordagem visa explicar as mudanças de estado da potência inserida anual per capita da GD fotovoltaica e a evolução da tecnologia no estado da Paraíba. Os resultados contribuirão para compreender a dinâmica regional e de mercado para subsidiar novas políticas públicas e investimentos privados no setor. Além das contribuições para o cenário da Paraíba, os métodos apresentados podem contribuir

para avaliação da diversidade da matriz elétrica e/ou energética em outros estados brasileiros e do cenário nacional.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo foi a potência inserida anual, em quilowatt – kW, per capita da GD fotovoltaica dos municípios da Paraíba de 2014 a 2021. As unidades geradoras foram classificadas de acordo com o grupo de tensão, que pode ser alta tensão (maior ou igual 1.000 V) ou baixa tensão (abaixo de 1.000 V).

Os dados de potência das unidades geradoras fotovoltaicas na Paraíba estão disponíveis na Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração da ANEEL (SCG/ANEEL). Já a população das cidades da Paraíba esteve disponível no Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE), referentes a 2010 e 2021. Para estimar a população dos demais anos utilizou a Taxa de Crescimento Geométrico - TGC (Equação 6.1), que também pode analisar ganhos e quedas na potência instalada, entre 2014 a 2021.

$$TGC = \left[\sqrt[\Delta t]{\frac{V_f}{V_0}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (6.1)$$

onde, V_f = potência instalada (kW) da geração distribuída fotovoltaica no ano final; V_0 = potência instalada (kW) da geração distribuída fotovoltaica no ano inicial; Δt = variação do tempo em anos.

6.2.2 Cadeias Espaciais de Markov

As cadeias espaciais de Markov são uma ferramenta que determinam as chances de uma variável, que se encontra em um estado determinado, alcançar outros estados possíveis. É possível fazer estudo simultâneo da dinâmica espacial (AGOVINO et al., 2019).

6.2.2.1 Cadeias Clássicas de Markov

O objetivo da análise clássica das cadeias de Markov é mapear a distribuição das taxas de um fator em um período para um período imediatamente posterior, estimando o desenvolvimento da distribuição ao longo do tempo (CLARK; REY, 2017). Este processo estocástico especifica que o estado futuro da variável de uma região só depende do estado imediatamente anterior. É identificada a probabilidade para uma variável, em t, alcance

outro estado no instante posterior, $t+1$. As probabilidades encontradas não devem assumir valores negativos e a soma das probabilidades do estado inicial, em determinado período, devem ser igual a 1.

Essa metodologia elabora uma matriz de transição, que mostra a probabilidade da variável analisada migrar para outros estados e para manter-se em seu estado original. Então, é especificado um vetor das probabilidades de estados de mudança por ano e um vetor com o número de anos estudados, sendo formada a matriz de transição de Markov ($k \times k$) que é mostrada de acordo com a Equação 6.2.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{k1} & \cdots & P_{kk} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Onde, i é o estado atual e j é o estado alcançado no momento seguinte de tempo.

6.2.2.2 Cadeias Espaciais de Markov - SMC

As abordagens clássicas das cadeias de Markov não conseguem analisar o quanto a regionalidade influencia no estudo de distribuição espacial. A Cadeia Espacial de Markov analisa a distribuição regional pelo modelo de Markov clássico e inclui as dependências regionais com variáveis que espelham o impacto da vizinhança (DECEWICZ, 2013). Ela é a junção da metodologia de cadeia de Markov, que estuda a dinâmica dos processos, com a econometria espacial, sendo possível analisar a dinâmica da evolução das regiões dentro dos contextos espaciais.

O componente espacial das SMCs relaciona-se diretamente ao coeficiente de autocorrelação espacial de Moran, definido pela Equação 6.3, que considera o fator da dependência (defasagem).

$$I_{Moran_Global} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (6.3)$$

em que, n = número de regiões, w_{ij} = valor do elemento ij da matriz de proximidade espacial, Y_i = potência instalada da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região i , Y_j = potência instalada da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região j , \bar{Y} média da potência instalada da geração distribuída fotovoltaica.

A análise local do Índice de Moran (LISA), Equação 6.4, foi integrada à análise e auxiliou na compreensão da dinâmica regional dos vizinhos. Os dados do LISA são

importantes para explorar e avaliar os padrões de aglomeração espacial existentes, assim como os agrupamentos (ANSELIN, 1995).

$$I_{Moran_local} = (Y_j - \bar{Y}) \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (6.4)$$

em que, n = número de regiões, w_{ij} = valor do elemento ij da matriz de proximidade espacial, Y_i = potência instalada da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região i , Y_j = potência instalada da geração distribuída fotovoltaica (alta tensão ou baixa tensão) na região j , \bar{Y} média da potência instalada da geração distribuída fotovoltaica. O índice de I de Moran local pode assumir característica de um *cluster* com valores de atributos: altos (HH, *high-high*), baixos (LL, *low-low*), *outlier* de valor alto cercado de valores baixos (HL, *high-low*) e um *outlier* com a analogia inversa (LH, *low-high*).

A variável de potência instalada per capital anual da GD fotovoltaica foi dividida em $k=4$ estados para o cálculo da SMC, com possíveis estados iniciais e finais do município e seus vizinhos. Quando a quantidade de estados aumenta também aumenta o nível de detalhamento da análise, mas se o intervalo estudado possuir valores similares e/ou próximos, a quantidade de células nulas é maior. É possível adotar critérios distintos para a definição dos k estados. Schettini et al. (2011) adotaram a média e um desvio padrão, na definição dos quatro estados. Em um primeiro exercício realizado com nossos dados, foi observado valores elevados do desvio padrão em relação à média, indicando grande dispersão dos valores de potência inserida entre os municípios, especialmente para os primeiros anos da amostra. Por isso, neste artigo, ao invés de utilizar um desvio padrão, considerou-se meio desvio padrão, possibilitando maior detalhamento da distribuição dos municípios entre as classes de potência.¹

Assim, um município é classificado como H (*high*) se seu valor de potência instalada per capita da GD fotovoltaica está entre a média e meio desvio-padrão. HH (*high-high*) é quando o valor da potência inserida do município se encontra superior à meio desvio padrão além da média. O L (*low*) são os valores entre a média e menos meio desvio padrão e LL (*low-low*) é menor que meio desvio padrão abaixo da média. Como a

¹ No anexo, apresentam-se os resultados das análises considerando a média e um desvio padrão completo para a definição dos quatro estados.

tecnologia não está presente em todos os municípios da Paraíba, considerou-se um estado extra para a ausência de tecnologia NaN (*Not a Number*), chegando a 5 classes. Caso a potência inserida esteja ausente na vizinhança, a defasagem espacial será nula, mas se houver pelo menos um município diferente do NaN, utiliza-se a estimativa da dependência espacial.

Os aspectos dinâmicos e espaciais são analisados entre 2014 e 2021 para potência per capita das novas instalações anuais totais, além de baixa e alta tensão. As características do espaço regional são reunidas na matriz de transição espacial que terá dimensão $k \times k \times k$, considerando o estado inicial e final do município, além do estado de sua vizinhança. Esta matriz apresenta o movimento de uma região para estados superiores ou inferiores ao longo do tempo. Leva-se em consideração a interação espacial favorável ou desfavorável das regiões vizinhas com estados iguais, maiores ou inferiores e o efeito da vizinhança sobre a região analisada (PRECIADO et al., 2017). Por considerar os aspectos regionais e a influência da vizinhança, as Cadeias Espaciais de Markov são mais interessantes para a amostra analisada.

O estado dos vizinhos da região é definido com auxílio da matriz W de pesos espaciais do tipo rainha e calcula-se uma média ponderada da potência dos vizinhos para cada município da amostra. Município e vizinhança são, portanto, classificados no estado ao qual ele pertence (LL, L, H, HH). A Tabela 6.1 exemplifica uma matriz espacial de transição de Markov para apenas 2 estados e dois períodos, inicial e final. Cada célula da matriz mostra a probabilidade de transição de um estado para outro. Por exemplo, a célula 2×1 ($P_{HL/L}$) indica a probabilidade que uma região tem de estar no estado de alta potência no ano t_0 ir para um estado de baixa potência no ano t_1 , levando em consideração que seus vizinhos estão no estado de baixa potência.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6.2 mostra os 20 municípios mais relevantes de 2021 para potência instalada anual per capita da GD fotovoltaica da Paraíba, sua evolução de 2014 a 2021 e a taxa média anual de crescimento do primeiro ano de instalação a 2021. A Paraíba apresentou-se com 0,0403 kW/hab em 2021, e as cidades de Patos (0,0741 kW/hab), Catolé do Rocha (0,0737 kW/hab) e Areia de Baraúnas (0,0683 kW/hab) ocuparam os primeiros lugares do *ranking* dos municípios paraibanos.

Dos sete municípios que destacaram na potência instalada anual per capita estadual, seis pertencem à região intermediária de Patos. Das 20 cidades mais relevantes

em 2021, 60% localizaram-se no semiárido paraibano, na região intermediária de Patos ou Sousa-Cajazeiras. Este crescimento do uso da tecnologia fotovoltaica no semiárido da Paraíba foi reflexo do potencial energético, devido aos altos índices anuais de irradiação solar, e baixo custo da terra nesta região do Brasil que se conecta à viabilidade econômica do empreendimento (CUNHA; PONTES, 2022).

Tabela 6.14. Desenvolvimento da matriz espacial de transição de Markov.

Influência da vizinhança	Estado		t_1	
	t_0		L	H
L	L		$P_{LL/L}$	$P_{LH/L}$
	H		$P_{HL/L}$	$P_{HH/L}$
H	L		$P_{LL/H}$	$P_{LH/H}$
	H		$P_{HL/H}$	$P_{HH/H}$

Fonte: Schettini et al. (2011).

Tabela 6.2. Evolução da potência instalada anual per capita (kW/hab) dos 20 municípios mais relevantes em 2021, na Paraíba de 2014 a 2021.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	TCG (%)
Patos	0,0001	-	-	0,0010	0,0029	0,0216	0,0341	0,0741	177
Catolé do Rocha	-	0,0004	-	-	0,0143	0,0531	0,0936	0,0737	137
Areia de Baraúnas	-	-	-	-	-	-	0,0120	0,0683	472
Riachão do Poço	-	-	-	-	-	-	0,0056	0,0639	1032
Itaporanga	-	-	0,0001	-	-	0,0131	0,0301	0,0630	317
São Bento	-	-	-	-	0,0075	0,0253	0,0478	0,0627	103
São Mamede	-	-	-	-	0,0052	0,0105	0,0109	0,0579	123
Aparecida	-	-	-	0,0113	0,0329	0,0165	0,0134	0,0569	50
Massaranduba	-	-	-	-	-	0,0018	-	0,0555	454
Sousa	-	-	0,0004	0,0089	0,0293	0,0314	0,0740	0,0522	172
São José dos Ramos	-	-	-	-	-	-	0,0055	0,0516	833
Conde	-	0,0000	-	0,0002	0,0004	0,0117	0,0311	0,0491	320
Cuitegi	-	-	-	-	-	-	0,0016	0,0412	2553
São João do Rio do Peixe	-	-	-	-	0,0076	0,0228	0,0115	0,0412	76
Pombal	-	-	0,0003	0,0020	0,0233	0,0192	0,0251	0,0398	159
São João do Cariri	-	-	-	0,0006	-	-	0,0526	0,0386	182
Cabedelo	-	-	0,0014	0,0022	0,0038	0,0194	0,0253	0,0374	93
Uiraúna	-	-	-	-	0,0018	0,0186	0,0221	0,0341	168
Brejo do Cruz	-	-	-	-	-	0,0060	0,0320	0,0340	137
Lucena	-	-	-	-	-	0,0002	0,0132	0,0333	1100
Paraíba	0,000004	0,000006	0,000097	0,00043	0,002308	0,00694	0,012296	0,018496	233

Fonte: ANEEL (2022).

Ao analisar a taxa média anual crescimento dos municípios paraibanos entre o primeiro ano de instalação e 2021, Cuitegi se destacou entre os demais com 2.553% a.a., localizado na região intermediária de João Pessoa, saindo de 10,5 kW (2020) e chegou a 278 kW (2021). Cidades como Lucena e Riachão do Poço também tiveram TGC superiores a 1.000%, localizados nessa região intermediária.

A Tabela 6.3 mostra os municípios mais relevantes de 2021 para a potência instalada acumulada per capita da GD fotovoltaica com sua evolução de 2014 a 2021 e a taxa de crescimento média anual do primeiro ano de instalação a 2021. O estado da Paraíba apareceu com taxa de crescimento de 272% a.a., quando comparou o primeiro e último ano de instalação, refletindo o desenvolvimento do uso da tecnologia fotovoltaica na Paraíba.

Tabela 6.3. Evolução da potência instalada acumulada per capita (kW/hab) dos municípios mais relevantes em 2021, na Paraíba de 2014 a 2021.

Cidade	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	TGC(%)
Catolé do Rocha	-	0,421	0,419	0,416	14,693	67,684	160,900	233,291	187
Sousa	-	-	0,353	9,297	38,506	69,719	143,329	194,541	253
São Bento	-	-	-	-	7,546	32,757	80,281	141,792	166
Patos	0,060	0,059	0,059	1,080	3,948	25,495	59,406	133,000	201
Aparecida	-	-	-	-	44,105	60,194	73,110	129,128	43
Cajazeiras	-	-	-	0,216	15,732	61,219	97,480	120,989	386
Pombal	-	-	0,339	2,320	25,582	44,729	69,785	109,479	218
Itaporanga	-	-	0,050	0,049	0,049	13,107	43,125	105,770	363
Alagoinha	-	-	-	-	-	0,972	71,002	93,273	880
São João do Cariri	-	-	-	0,614	0,617	0,619	53,217	91,947	250
Conde	-	0,009	0,009	0,177	0,590	12,295	43,221	91,225	368
Cabedelo	-	-	-	3,528	7,287	26,553	51,463	87,409	90
São Mamede	-	-	-	-	5,195	15,688	26,625	84,537	153
São João do Rio do Peixe	-	-	-	-	7,615	30,386	41,872	83,099	122
Paulista	-	-	-	1,232	18,409	48,325	72,503	81,350	185
Areia de Baraúnas	-	-	-	-	-	-	11,957	80,176	571
Malta	-	-	-	-	2,190	41,379	54,458	78,134	229
Uiraúna	-	-	-	-	1,774	20,349	42,356	76,195	250
Brejo do Cruz	-	-	-	-	-	6,035	38,005	71,629	245
Santa Luzia	-	-	-	-	1,423	14,772	43,776	70,389	267
Paraíba	0,000004	0,000010	0,000107	0,000539	0,002843	0,009765	0,0219988	0,040278	272

Fonte: ANEEL (2022).

Catolé do Rocha foi a cidade com mais instalações com sistemas fotovoltaicos (7,2 MW) distribuídos para uma população de 30.819. Esta cidade era da região

intermediária de Patos, assim como São Bento e Patos, terceiro e quarto lugar do *ranking*. Sousa, Cajazeiras e Aparecida eram da região intermediária de Sousa-Cajazeiras, semiárido da Paraíba, apareceram entre as cidades com maior potência per capita acumulada do estado.

Observou entre os principais municípios da Paraíba, que nomeiam as regiões intermediárias (Patos, Sousa, Cajazeiras, Campina Grande e João Pessoa), apenas as cidades localizadas no semiárido. Isto ocorreu devido ao porte municipal, por reflexo da capacidade populacional serem inferiores de Campina Grande e João Pessoa, mas o uso da tecnologia de sistemas fotovoltaicas mostraram-se desenvolvidas em nível igual ao superior. Dos 20 municípios presentes no *ranking* estadual, 16 delas estiveram presentes na região do semiárido, com baixa densidade populacional e alto potencial de uso tecnológico. Neste quadro evolutivo, a cidade de Alagoinha, da região intermediária de João Pessoa, teve maior taxa de crescimento anual potência per capita instalada com 880 % a.a.. Esta cidade tinha potência instalada de 14 kW em 2019 e passou a ter 1.364,5 kW em 2021, com uma população que aumentou em apenas 220 habitantes.

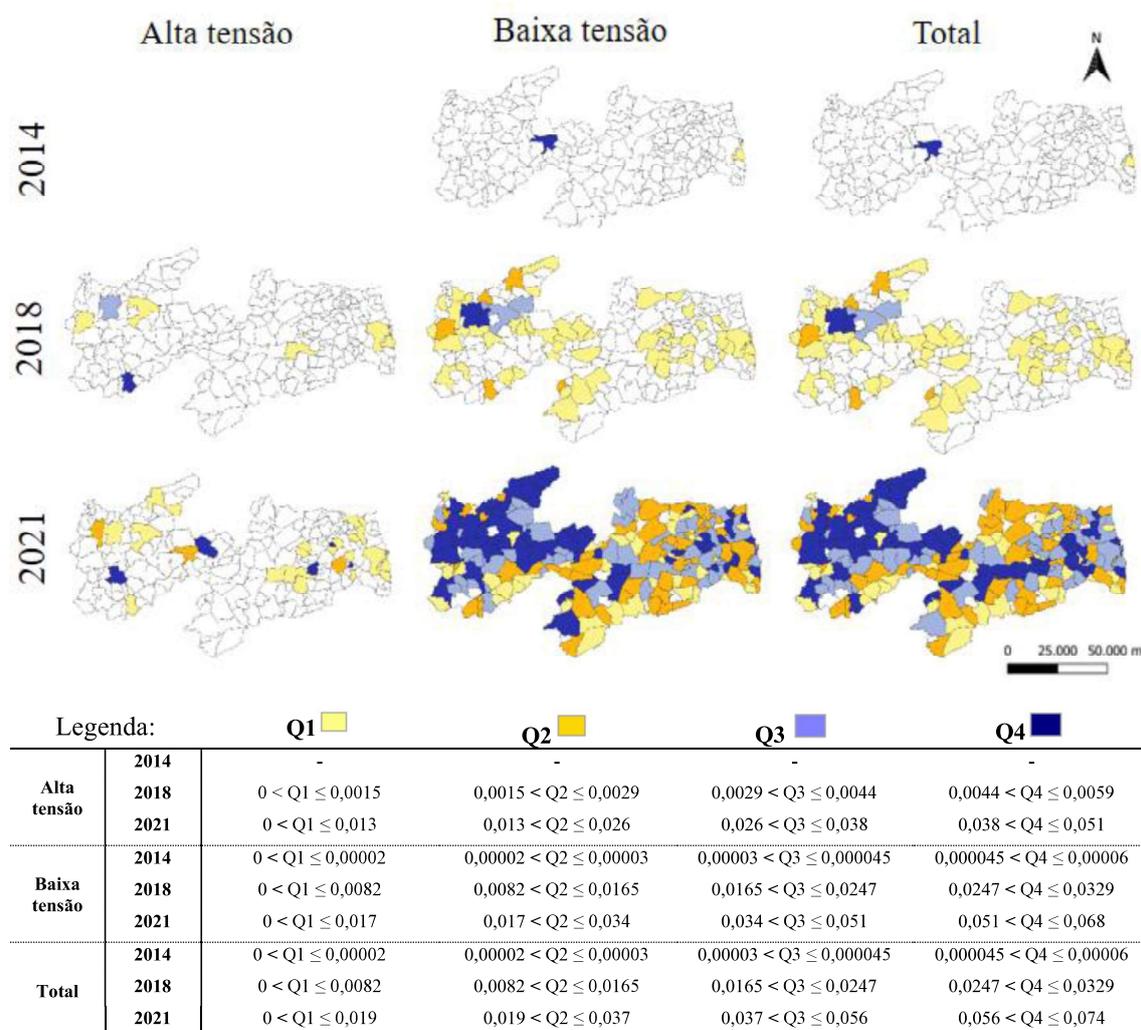
A Figura 6.1 mostra a evolução da potência instalada anual per capita, em kW/hab, da GD fotovoltaica na Paraíba nos anos de 2014, 2018 e 2021 para alta tensão, baixa tensão e total, que se refere a todas as instalações. No primeiro ano de potência instalada na Paraíba, 2014, dos 223 municípios do estado apenas João Pessoa e Patos possuíam com valor per capita de 0,012 e 0,059 kW kW/hab de baixa tensão. Embora a potência instalada no município de João Pessoa tenha sido mais alta, sua população foi maior que Patos, tornando o valor da potência instalada per capita mais baixo.

As instalações totais assemelharam às instalações de baixa tensão, em 2018, 64 municípios possuíam instalações totais e de baixa tensão, ou seja, todas as cidades que a alta tensão foi inserida, também possuía instalações de baixa tensão. O mesmo aconteceu em 2021, com sistema distribuídos em 209 cidades. As cidades de Aparecida e Areia de Baraúnas foram as cidades com maior inserção de potência per capita em 2018 e 2021, respectivamente. As duas cidades estavam localizadas no Noroeste da Paraíba, região semiárida. Para as instalações totais, a cidade de Aparecida também teve maior índice em 2018 e em 2021, a maior potência per capita inserida ficou na cidade de Patos, refletindo a relevância das instalações de alta tensão que proporcionaram esta diferença.

Foi notório municípios pertencentes a região intermediária de Patos e Sousa-Cajazeiras, isto pode ser reflexo da baixa densidade populacional e custo da terra mais baixo, além de ser uma tecnologia favorável à região semiárida. A potência de saída dos

sistemas fotovoltaicos possuiu relação linear com a radiação solar, que teve valores típicos altos e eficientes no semiárido Nordeste, em comparação com outras regiões do Brasil (LIMA et al., 2017). A partir de 2016, as instalações de alta tensão começaram sua inserção no sistema distribuído da Paraíba. Em 2018, 7 cidades da Paraíba instalaram potência proveniente de sistemas de alta tensão na rede, Princesa Isabel e Sousa estavam no semiárido paraibano. Em 2021, 29 cidades da Paraíba tiveram inserção de potência instalada de alta tensão na rede, Massaranduba que inseriu 720 kW para 14.077 habitantes.

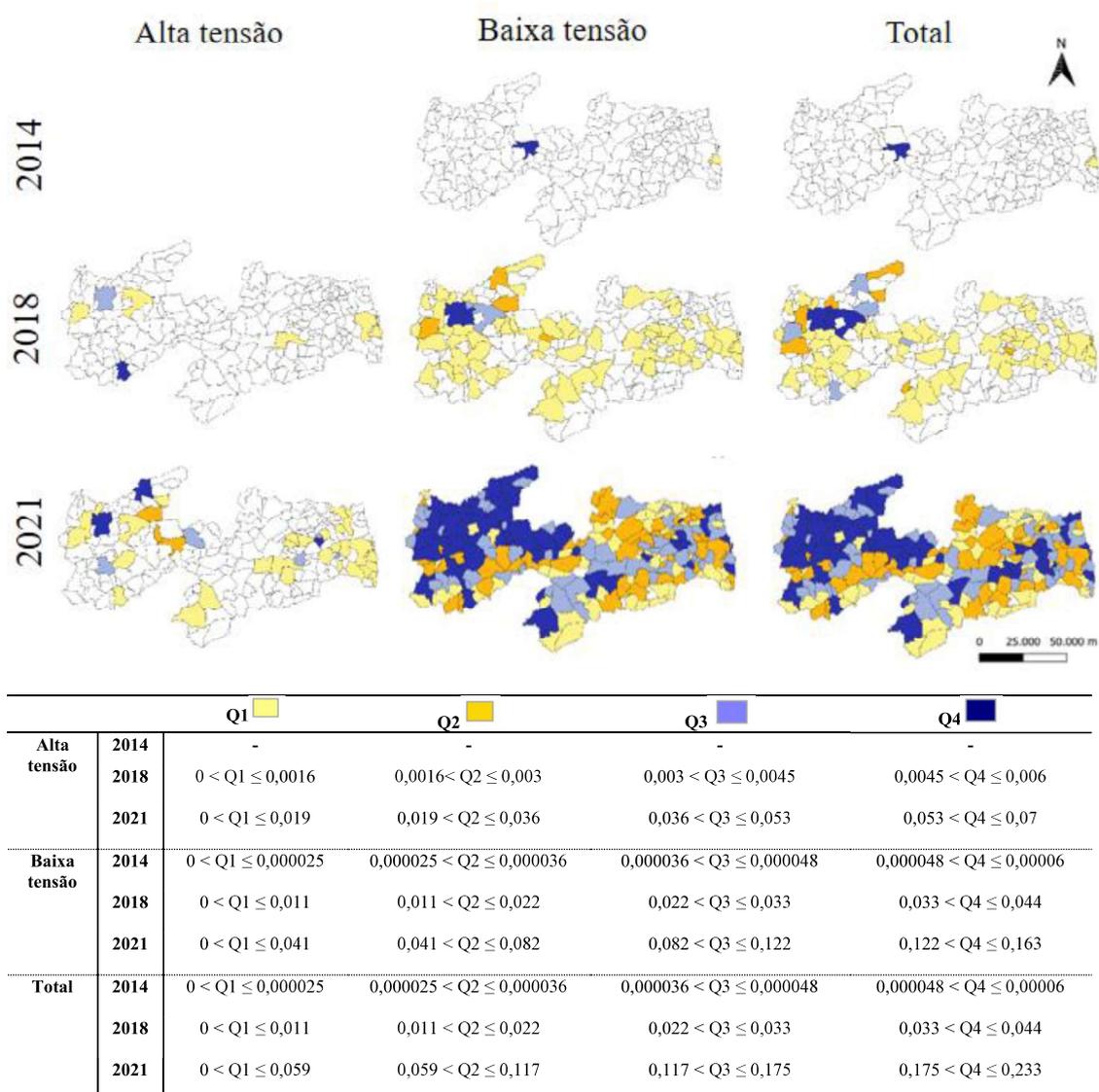
Figura 6.1. Evolução da potência instalada per capita anual da Geração Distribuída fotovoltaica de baixa tensão, alta tensão e instalações totais dos municípios da Paraíba, para 2014, 2018 e 2021.



Fonte: ANEEL (2022).

A Figura 6.2 mostra a evolução da potência instalada per capita acumulada da GD fotovoltaica na Paraíba para baixa tensão, alta tensão e instalações totais das cidades para 2014, 2018 e 2021. Notou semelhança entre o mapa anterior, com exceção de poucos municípios, isto mostrou que as cidades onde houve maior potência instalada foram as cidades com maior instalação anual de novos sistemas.

Figura 6.2. Evolução da potência instalada per capita acumulada da Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba de baixa tensão, alta tensão e instalações totais dos municípios, para 2014, 2018 e 2021.



Fonte: ANEEL (2022).

Em 2021, para instalações totais e de baixa tensão, pode-se notar uma polarização do quartil Q4 nas regiões intermediárias de Patos e Sousa-Cajazeiras. Esta polarização foi

reflexo da baixa população nesta região do estado da Paraíba. Alguns fatores podem contribuir para a redução da população em zonas semiáridas. Estes fatores tornaram a sociedade vulnerável à variabilidade do clima e disponibilidade de água, diferente das outras regiões do estado, como o brejo e o litoral (KROL; BRONSTERT, 2007). A capital João Pessoa teve maior potência instalada em 2021, 25,8 MW. No entanto, aparece no quartil Q3, com índice per capita de 31,32 kW por habitante, em decorrência da densidade populacional, com mais de 825 mil habitantes.

Na Tabela 6.4 apresenta um resumo de como as potências instaladas inseridas anualmente e acumuladas se comportam no estado da Paraíba, nos anos de 2014, 2018 e 2021. Com o passar dos anos, a quantidade de municípios com a presença da tecnologia fotovoltaica foi aumentando e, em 2021, 98,6% das cidades da Paraíba possuíam instalação distribuída em seu território. A alta tensão teve sua primeira instalação em 2016, no último ano de análise, 18,8% das cidades da Paraíba possuíam instalação fotovoltaica desse tipo. Este tipo de instalação se concentra em João Pessoa e 53,8% das instalações de alta tensão do estado são do tipo comercial. Isto mostra que a tecnologia de alta tensão se aglomerou em cidades que são referências comerciais no estado.

Na Figura 6.3 é apresentado o I de Moran local, considerando uma matriz de vizinhança do tipo rainha, dos anos de 2014 a 2021 para potência instalada de GD fotovoltaica em kW per capita dos municípios da Paraíba. No ano de 2014, pode-se notar a predominância do padrão Baixo-Baixo no mapa que foi reflexo da baixa disseminação da tecnologia no estado, por ser o ano de inserção da GD fotovoltaica na Paraíba. No ano seguinte, a tecnologia já estava presente em seis municípios paraibanos e viu o padrão Alto-Baixo na região do semiárido do estado, que se referiu aos municípios com inserção de alta potência que tinham vizinhos com baixa potência da tecnologia de GD fotovoltaica. Em 2016, a tecnologia fotovoltaica de geração distribuída estava presente em doze cidades da Paraíba e foi o ano em que os municípios com classificação Alto-Alto apareceram no mapa. Isto ocorreu por cidades como Aguiar e Boa Ventura possuírem alto valor de potência per capita inserida. No ano seguinte, embora a quantidade de municípios com a presença de tecnologia tenha subido para vinte e nove, o índice se comportou com padrões semelhantes ao ano anterior. Em 2018, notou o início de um *cluster* do tipo Alto-Alto no norte do semiárido da Paraíba em decorrência dos municípios terem alta potência quando comparou com a quantidade de habitantes. Nos anos seguintes, enxergou aumento deste aglomerado e uma tendência à polarização. Os municípios do semiárido mostraram-se com o índice LISA do tipo Alto-Alto, enquanto os municípios próximos à região do

litoral da Paraíba tiveram o índice Baixo-Baixo. Isto pode ser reflexo da alta população próxima ao litoral que teve alta potência instalada, mas tornou-se diluída quando se trata da variável per capita. Já na região do semiárido, a potência instalada foi alta, mas com baixa densidade populacional, concentrando nos municípios e nos seus vizinhos.

Tabela 6.4. Parâmetros de análise da potência (kW) per capita da GD fotovoltaica de 2014 a 2021.

		Ano	Qtd de mun.	Mín	Máx	Média	Des. Pad.
Potência per capita anual instalada	Baixa tensão	2014	2	0,000013	0,000060	0,000036	0,000024
		2018	64	0,000029	0,032941	0,004549	0,006702
		2021	209	0,000254	0,068347	0,012345	0,011868
	Alta tensão	2014	-	-	-	-	-
		2018	7	0,000453	0,005873	0,001854	0,001913
		2021	29	0,001653	0,051147	0,013630	0,014622
	Total	2014	2	0,000013	0,000060	0,000036	0,000024
		2018	64	0,000029	0,383429	0,010736	0,047474
		2021	209	0,000254	0,074135	0,014254	0,014641
Potência per capita total instalada	Baixa tensão	2014	2	0,000013	0,000060	0,000036	0,000024
		2018	76	0,000037	0,04410	0,00469	0,007764
		2021	220	0,000599	0,16311	0,02511	0,02586
	Alta tensão	2014	-	-	-	-	-
		2018	8	0,000227	0,005873	0,001651	0,001868
		2021	42	0,001359	0,070179	0,017529	0,018209
	Total	2014	2	0,000013	0,000060	0,000036	0,000024
		2018	76	0,000049	0,04410	0,004905	0,008103
		2021	220	0,000599	0,23329	0,028459	0,031561

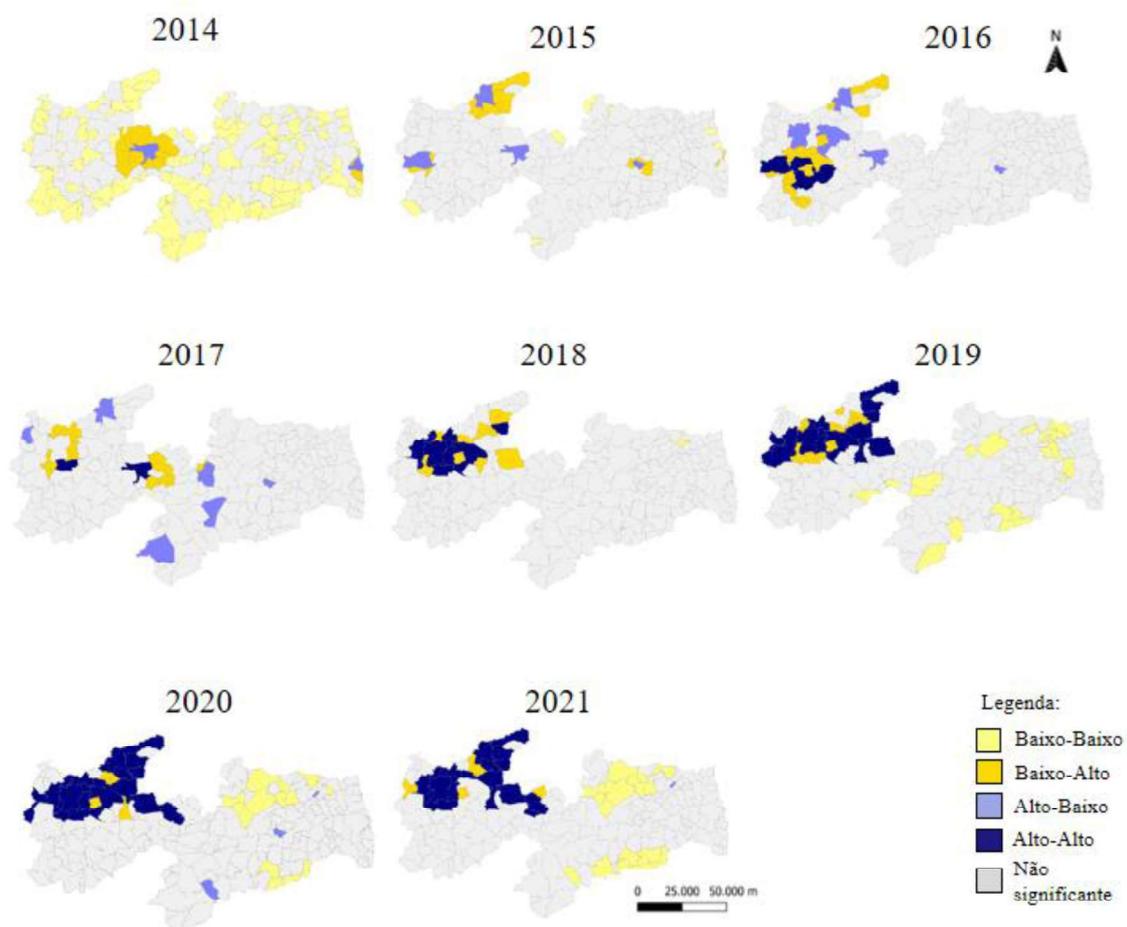
Fonte: ANEEL (2022).

Na Tabela 6.5 são mostradas as probabilidades da matriz de transição da cadeia espacial de Markov para a potência inserida² total da GD fotovoltaica na Paraíba de 2014

² Potência instalada per capita é a soma das potências que estão no sistema desde 2014. Potência

a 2021. A maior probabilidade de transição de estados, de 0,934, foi para os municípios que não possuíam instalação continuarem neste estado no período seguinte, considerando que seus vizinhos tampouco têm potência inserida. Na verdade, é importante ressaltar que o estado nulo se associou a uma inércia grande, em que a mudança de estado possui probabilidade inferior à manter-se neste estado, tal qual Schettini et al. (2011).

Figura 6.3. Distribuição espacial do I de Moran Local da potência instalada per capita anual (quilowatts – kW) das instalações de geração distribuída fotovoltaica para municípios da Paraíba, de 2014 a 2021.



Fonte: Os autores (2024).

inserida anual per capita refere-se à quantidade de potência per capita, em kW, que é instalada por ano no sistema. No trabalho, utilizou-se potência inserida anual per capita, pois a Cadeia Espacial de Markov faz a soma intrínseca em sua análise.

Tabela 6.5. Matriz de Transição da Cadeia Espacial de Markov para potência (kW) per capita da GD fotovoltaica inserida nos municípios da Paraíba de 2014 a 2021.

Vizinhança	$t_0 t_1$	NAN	LL	L	H	HH
NAN	NAN	0,934	0,033	0,020	0,006	0,007
	LL	0,125	0,375	0,375	0	0,125
	L	0,375	0,125	0,375	0	0,125
	H	1,000	0	0	0	0
	HH	0,667	0	0	0,333	0
LL	NAN	0,450	0,296	0,172	0,012	0,071
	LL	0,114	0,443	0,343	0,043	0,057
	L	0,102	0,388	0,306	0,143	0,061
	H	0	0,250	0	0,500	0,250
	HH	0,100	0,200	0,500	0	0,200
L	NAN	0,622	0,147	0,141	0,051	0,038
	LL	0,087	0,391	0,391	0,087	0,043
	L	0,077	0,308	0,288	0,192	0,135
	H	0	0,357	0,286	0,214	0,143
	HH	0	0,063	0,125	0,125	0,688
H	NAN	0,462	0,179	0,231	0,077	0,051
	LL	0,077	0,462	0,231	0,077	0,154
	L	0,056	0,278	0,500	0,111	0,056
	H	0	0,200	0,100	0,200	0,500
	HH	0,059	0,118	0,294	0	0,529
HH	NAN	0,509	0,140	0,175	0,070	0,105
	LL	0,182	0,273	0,182	0,091	0,273
	L	0,103	0,103	0,414	0,241	0,138
	H	0	0,158	0,211	0,158	0,474
	HH	0,063	0,063	0,094	0,250	0,531

Fonte: Os autores (2024).

Assim como obtido em Agovino et al. (2019), os valores da diagonal principal foram, em geral, mais altos indicando a predominância de um comportamento inercial.

Em geral, a probabilidade de um município manter-se no mesmo estado é relativamente alta, com casos que podem chegar a 68,8% de chance. Para os municípios cercados por vizinhos sem instalação, observou que a probabilidade dele estar no estado H no ano t_0 e migrar para o estado NAN no ano t_1 foi de 100%. Ou seja, todas as cidades que tiveram instalação acima da média, considerando que os seus vizinhos não tem instalação, voltaram a não ter instalação no ano seguinte. Estas cidades são Juazeirinho e Cural Velho que tiveram potência inserida em 2017 e em 2018 voltaram a não ter. Apesar de eventos assim serem raros, exemplifica a influência da vizinhança que embora haja migração para um estado de potência elevada, acaba voltando para o estado inicial, similar aos seus vizinhos. Casos assim mostram a importância da tecnologia a ser estabelecida no município, necessitar de acesso às regiões vizinhas, para que haja mudança para estados superiores de tensão e a manutenção neste estado.

Ao analisar os municípios que tiveram vizinhos acima da média (H e HH), notou-se que a probabilidade de haver mudança do estado H para o HH foi alta, assim como a probabilidade de manter-se no estado HH, podendo chegar a 53%. Isto pode-se ligar à força exercida pelo efeito da vizinhança nestas cidades, pois foi preciso vencer a inércia para haver a migração para outro estado. Anexo A, encontram-se as SMC calculadas considerando o valor de um desvio padrão em relação à média para a definição dos estados de potência. À diferença do que ocorre na Tabela 6.5, é possível observar uma maior quantidade de probabilidades iguais a zero e menor distribuição dos municípios entre os estados de potência.

Na Tabela 6.6, são mostradas as probabilidades da matriz de transição da cadeia espacial de Markov para a potência inserida de baixa tensão da GD fotovoltaica na Paraíba de 2014 a 2021. Os resultados da SMC para os municípios com baixa tensão foram semelhantes à matriz de transição dos municípios com instalação total de tensão, pois todos os municípios que tiveram inserção de alta tensão, já se instalaram em municípios com instalação de baixa tensão, em anos anteriores. Ao analisar os municípios com vizinhos do tipo LL pode-se ver que a probabilidade elevou-se para 60% nos municípios que eram H em t_0 e passaram a ser LL em t_1 , quando comparado com as instalações totais. Este fenômeno foi reflexo da queda da potência instalada per capita inserida, pois foi retirada a potência de alta tensão que estava sendo considerada na análise anterior.

Tabela 6.6. Matriz de Transição da Cadeia Espacial de Markov para potência (kW) per capita da GD fotovoltaica de baixa tensão inserida nos municípios da Paraíba de 2014 a 2021.

Vizinhança	$t_0 t_1$	NAN	LL	L	H	HH
NAN	NAN	0,934	0,033	0,020	0,004	0,009
	LL	0,125	0,375	0,375	0	0,125
	L	0,375	0,125	0,375	0	0,125
	H	1,000	0	0	0	0
	HH	0,667	0	0	0,333	0
LL	NAN	0,455	0,305	0,138	0,036	0,066
	LL	0,107	0,453	0,307	0,080	0,053
	L	0,089	0,378	0,311	0,156	0,067
	H	0	0,600	0,200	0	0,200
	HH	0,077	0,154	0,308	0,154	0,308
L	NAN	0,619	0,142	0,148	0,058	0,032
	LL	0,091	0,409	0,318	0,159	0,023
	L	0,125	0,325	0,225	0,175	0,150
	H	0	0,273	0,455	0	0,273
	HH	0	0,133	0,133	0	0,733
H	NAN	0,436	0,179	0,205	0,077	0,103
	LL	0	0,529	0,294	0,118	0,059
	L	0,071	0,357	0,214	0,214	0,143
	H	0	0,333	0,333	0,222	0,111
	HH	0,071	0,143	0,286	0,143	0,357
HH	NAN	0,517	0,100	0,183	0,100	0,100
	LL	0,174	0,348	0,130	0,130	0,217
	L	0,097	0,065	0,387	0,323	0,129
	H	0,042	0,125	0,208	0,042	0,583
	HH	0,056	0,056	0,139	0,194	0,556

Fonte: Os autores (2024).

Isto ocorreu, tal qual Alyousifi et al. (2020), pois as regiões com estados eficientes foram positivamente afetadas pelas regiões vizinhas eficientes, enquanto as regiões com

pouco desenvolvimento são influenciadas negativamente pelos vizinhos que a rodeiam. Sendo assim, teve alta probabilidade de haver a migração entre os estados H e LL, por consequência das regiões vizinhas que são LL.

Na Tabela 6.7 são mostradas as probabilidades da SMC para a potência instalada de alta tensão da GD fotovoltaica na Paraíba de 2016 a 2021. Na análise da cadeia de alta tensão identificou maior quantidade de probabilidades nulas em consequência da tecnologia de alta tensão estar presente em apenas 42 cidades em 2021. Esta influência causada pela vizinhança pode ser explicada por vários fatores, um deles foi a distribuição do público alvo das empresas especializadas em instalação de geração distribuída fotovoltaica. Pois, a partir do momento que a empresa instala-se na região, o raio de prospecção dela, em geral, engloba as cidades vizinhas. Outro fator, foi a disseminação dos benefícios da GD fotovoltaica, a partir das primeiras instalações dos municípios, principalmente em cidades de pequeno porte.

As instalações de alta tensão iniciaram posteriormente das demais, em 2016, e ainda não tinham disseminação no estado em decorrência das questões técnicas que dificultam a instalação. Além das maior burocracia junto à distribuidora, por necessitar de maiores análises do sistema e o seu padrão de entrada (ENERGISA NDU 002; NDU 015, 2017). Além disso, a maior parte das instalações da Paraíba foram residenciais que, em sua maioria, são de baixa tensão. Por isso, o predomínio de probabilidades não nulas nas linhas NAN. A probabilidade dos municípios estarem sem instalação no ano t_0 e manterem assim, considerando que seus vizinhos não tiveram instalação, é de 96,6%. Esta alta probabilidade foi consequência dos poucos municípios com instalação no estado da Paraíba. Isto mostra que foi mais difícil as instalações de alta tensão vencerem a inércia de não ter potência instalada, com vizinhos no mesmo estado, em comparação com as instalações de baixa tensão.

Para os municípios que possuem vizinhos acima da média (H e HH), em sua maioria, encontram-se no estado NAN no ano t_0 . A maior probabilidade encontrada em todas as análises presentes neste trabalho foi referente aos municípios que tiveram vizinhos no maior estado de potência (HH), mas não com instalação em t_0 e se mantiveram assim em t_1 . Isto foi um caso atípico, já que a influência da vizinhança deveria ajudar a vencer a inércia e haver a migração para estados maiores. No entanto, isto pode ser explicado pela baixa quantidade de municípios com potência instalada de alta tensão, fazendo com que a saída do estado NAN torne-se mais difícil.

Tabela 6.7. Matriz de Transição da Cadeia Espacial de Markov para potência (kW) per capita da GD fotovoltaica de alta tensão inserida nos municípios da Paraíba de 2016 a 2021.

Vizinhança	$t_0 t_1$	NAN	LL	L	H	HH
NAN	NAN	0,966	0,012	0,008	0,004	0,011
	LL	0,250	0,500	0	0	0,25
	L	0,250	0	0,750	0	0
	H	0	0	1	0	0
	HH	0,667	0,333	0	0	0
LL	NAN	0,864	0,034	0,085	0	0,017
	LL	0,500	0,500	0	0	0
	L	0	0	0	0	0
	H	0	0	0	0	0
	HH	1	0	0	0	0
L	NAN	0,902	0,073	0,024	0	0
	LL	0	0,667	0,333	0	0
	L	0,545	0,182	0,182	0,091	0
	H	0	0	0	0	0
	HH	0	0	0	0	0
H	NAN	1,000	0	0	0	0
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0	0	0
	H	1	0	0	0	0
	HH	0	0	0	0	0
HH	NAN	0,971	0	0	0,029	0
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0	0	0
	H	0	0	0	0	0
	HH	0	0	1	0	0

Fonte: Os autores (2024).

Os municípios que possuem vizinhos abaixo da média (LL e L), possuíam probabilidades mais distribuídas entre os estados abaixo da média. Isto foi consequência

da baixa potência instalada nos municípios, embora as instalações individuais tendam a ser maiores, pois a demanda de consumidores de alta tensão, em geral, foi maior do que os de baixa tensão. Mas, como as unidades geradoras foram em baixa quantidade, a potência instalada no município acaba sendo reduzida também.

A Tabela 6.8 mostra as probabilidades das cidades permanecerem no mesmo estado, independente dos seus vizinhos. Quando a vizinhança foi desconsiderada, a probabilidade das instalações totais e de baixa tensão estarem no estado NAN no ano t_0 e permanecerem em t_1 diminuiu, em comparação com os resultados com efeitos de vizinhança. O efeito também ocorreu para alta tensão, mas neste caso a diferença das probabilidades com e sem vizinhança foram bastante semelhantes. Por isso, pode-se entender que a chance das instalações de baixa tensão (e totais, por consequência) saírem da inércia do estado sem potência instalada foi maior quando não se consideram as questões espaciais, indicando a importância de melhorar não somente o município, mas o seu entorno.

Tabela 6.8. Probabilidades de um município permanecer no mesmo estado, independentemente de sua vizinhança.

	NAN	LL	L	H	HH
Baixa tensão	0,779	0,431	0,297	0,054	0,494
Alta tensão	0,958	0	0,333	0	0
Total	0,779	0,403	0,346	0,204	0,500

Fonte: Os autores (2024).

A baixa disseminação da tecnologia de alta tensão na Paraíba se reflete no predomínio de probabilidades nulas nas transições de estado. Sem considerar efeitos espaciais, ou os municípios permanecerem sem instalação ou possuírem um estado L de potência inserida. Já nos sistemas de baixa tensão, mais disseminado no estado, a probabilidade do município permanecer no estado LL foi ligeiramente mais baixa do que a de permanecer no estado HH. Já municípios com estado L e H tenderiam a migrar mais.³

A Tabela 6.9 resume as matrizes da SMC calculadas. Foram contabilizados os casos de melhora e piora de estados de potência, considerando e não a influência dos

³ O anexo B apresenta as probabilidades de as cidades permanecerem no mesmo estado, independente dos seus vizinhos. O estado LL possui apenas probabilidades nulas pelo elevado valor de um desvio padrão em relação à média.

vizinhos e calculadas as respectivas probabilidades. A probabilidade dos municípios com instalações totais e de baixa tensão melhorarem foi de aproximadamente 20%, enquanto a probabilidade destes municípios melhorarem, considerando que seus vizinhos são melhores foi de aproximadamente 40%. Portanto, quando os municípios estão rodeados de vizinhos com melhores estados de potência inserida, dobra a probabilidade deles próprios melhorarem de estado. Para a alta tensão, estar rodeado de vizinhos melhores mais do que dobra a probabilidade de melhorar (2,697).

Tabela 6.9. Resumo das Cadeias Espaciais de Markov

	Baixa tensão	Alta tensão	Total
Casos de municípios que poderiam melhorar	1.441	1.103	1.443
Casos de municípios que melhoraram	308	36	304
Probabilidade de melhorar	0,213	0,033	0,211
Casos de municípios com melhores vizinhos	521	146	518
Casos de municípios com melhores vizinhos que melhoraram	222	13	216
Probabilidade de melhorar com vizinhos melhores	0,426	0,089	0,417
Probabilidade de melhorar – (sem vizinhos/com vizinhos)	2,000	2,697	1,976
Casos de municípios que poderiam piorar	647	68	647
Casos de municípios que pioraram	145	24	139
Probabilidade de piorar	0,224	0,353	0,215
Casos de municípios com piores vizinhos	129	13	131
Casos de municípios com piores vizinhos que pioraram	69	7	65
Probabilidade de piorar com vizinhos piores	0,534	0,538	0,496
Probabilidade de piorar – (sem vizinhos/com vizinhos)	2,384	1,524	2,307

Fonte: Os autores (2024).

Para cidades que tinham instalações totais e de baixa tensão, a probabilidade de piorar foi também em torno de 20%, mas ao considerar que os vizinhos foram piores que o próprio município, a probabilidade de piorar sobe para quase 50%. Esse efeito negativo da vizinhança não ocorre com tanta intensidade nos sistemas de alta tensão, pois nestes, a chance de piorar com vizinhos ruins sobe em 1,5 vezes, enquanto que no sistema de

baixa tensão, a chance de piorar com uma vizinhança ruim é de 2,4 vezes. Esses resultados de repercussões positivas, quando houve melhora, e negativas, quando há piora, foi também mostrado por Wang et al. (2023). Nota-se, portanto, que o efeito positivo da vizinhança é mais relevante para os sistemas de alta tensão.⁴

6.4 CONCLUSÃO

O estudo analisou a dinâmica de distribuição e influência dos vizinhos da potência inserida per capita da GD fotovoltaica da Paraíba, de 2014 a 2021, destacando o processo de oferta e evolução do uso da tecnologia solar fotovoltaica. Os resultados mostraram que esta tecnologia apresentou crescimento significativo nos municípios da Paraíba, passando de potência instalada em 2 municípios em 2014 para 217 em 2021.

Foi possível notar que a região semiárida da Paraíba, região intermediária de Patos e Sousa-Cajazeiras se destacaram em consequência do potencial tecnológico fotovoltaico regional e baixa densidade populacional, elevando a potência instalada per capita. Com o LISA, notou-se uma tendência à polarização dos municípios Alto-Alto no noroeste do estado, região semiárida, e Baixo-Baixo no leste próximo ao litoral do estado.

As maiores probabilidades encontradas foram dos municípios com vizinhos sem instalação e estes estavam sem instalação em t_0 e t_1 , em decorrência da inércia para sair do estado. Quando a vizinhança foi considerada, observou maior probabilidade dos municípios piorarem ou melhorarem seus estados, em relação à probabilidade calculada sem o efeito da vizinhança. Isso demonstrou que a influência espacial deve ser considerada nos cálculos de investimentos e de desenhos políticas públicas. Pode-se ver que a dinâmica regional da GD fotovoltaica influenciou nos arranjos produtivos locais, o que torna determinadas localidades mais atraentes em termos de geração de emprego e renda.

Este artigo permitiu entender a distribuição espacial e dinâmica de transição da potência instalada da GD fotovoltaica per capita e sua organização de mercado. Na cadeia espacial de Markov foi possível identificar a importância da vizinhança no desempenho tecnológico dos municípios. Os resultados podem embasar a tomada de decisões e

⁴ O Anexo C mostra o resumo para a análise considerando os estados de potência inserida calculados com um desvio padrão em relação à média. Os resultados mantêm um padrão semelhante ao cálculo com meio desvio padrão, acentuando os efeitos da vizinhança.

orientar políticas públicas para o desenvolvimento e evolução do setor, ao ter ciência da localização otimizada para novos investimentos.

Estudos futuros podem investigar o efeito da retirada dos sistemas distribuídos, quando os painéis começarem a se tornar inviáveis. A nível nacional, esta metodologia apresentada pode ser utilizada para avaliar a matriz energética do país para geração distribuída e centralizada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração Distribuída. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empresendimentos-de-geracao-distribuida. Acesso em: 19 abr. 2022.

AGOVINO, M; CROCIATA, A; SACCO, P.L. Proximity effects in obesity rates in the US: A Spatial Markov Chains approach. **Social Science & Medicine**, v. 220, p. 301-311, 2019.

ALYOUSIFI, Yousif et al. Modeling the spatio-temporal dynamics of air pollution index based on spatial Markov chain model. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, p. 1-24, 2020.

ANSELIN, Luc. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.

BÓDIS, Katalin et al. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109309, 2019.

CHEN, Yanbin; YIN, Guanwen; LIU, Kai. Regional differences in the industrial water use efficiency of China: The spatial spillover effect and relevant factors. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105239, 2021.

CLARK, Stephen D.; REY, Sergio. Temporal dynamics in local vehicle ownership for Great Britain. **Journal of Transport Geography**, v. 62, p. 30-37, 2017.

CUNHA, Diego PS; PONTES, Karen V. Desalination plant integrated with solar thermal energy: a case study for the Brazilian semi-arid. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129943, 2022.

DECEWICZ, A. Regional income disparities in central-eastern europe—a markov model approach. In: **The 7th International Days of Statistics and Economics**, 2013.

DOYLE, G. N. D., JUNIOR, P. R., ROCHA, L. C. S., CARNEIRO, P. F. G., PERUCHI, R. S., JANDA, K., AQUILA, G. Impact of regulatory changes on economic feasibility of distributed generation solar units in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101660, 2021.

ENERGISA. NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA. NDU 002- – Fornecimento de energia elétrica em tensão primária. ENERGISA.

ENERGISA. NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA. NDU 015-Critérios para a conexão de acessantes de centrais geradoras e geração distribuída ao sistema de distribuição para conexão em média tensão.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. Dados e estatísticas. 2022. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/painel-de-dados-de-micro-e-minigeracao-distribuida-pdgd->>. Acesso em: 14 jul. 2022.

FAROOQ, A. S; ZHANG, P. Technical assessment, economic viability, and environmental impact of a solar-driven integrated space and water heating system in various configurations. **Energy for Sustainable Development**, v. 71, p. 330-340, 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2022. Disponível em: < <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> >. Acesso em: 13 jul. 2022.

JONG, P., DARGAVILLE, R., SILVER, J., UTEMBE, S., KIPERSTOK, A., TORRES, E. A Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid. **Applied Energy**, v. 195, p. 538-555, 2017.

KI-MOON, B. Kyoto Protocol Reference Manual. In: **United Nations Framework Convention on Climate Change**. UNFCCC, 2008.

KROL, M. S., & BRONSTERT, A Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 2, p. 259-268, 2007.

LEE, Chien-Chiang et al. How does green finance drive the decarbonization of the economy? Empirical evidence from China. **Renewable Energy**, 2023.

LI, Jianglong; HUANG, Jiashun. The expansion of China's solar energy: Challenges and policy options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 132, p. 110002, 2020.

LIAO, Felix HF; WEI, Yehua Dennis. Dynamics, space, and regional inequality in provincial China: A case study of Guangdong province. **Applied Geography**, v. 35, n. 1-2, p. 71-83, 2012.

LIMA, L. C; FERREIRA, L. A; MORAIS, F.H.B.L. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 79-85, 2017.

LV, Chengchao et al. Regional gap and the trend of green finance development in China. **Energy Economics**, v. 102, p. 105476, 2021.

MARKOV, A. A. Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain. Reprinted in Appendix B of: R. Howard. Dynamic Probabilistic Systems, volume 1: Markov Chains. **John Wiley and Sons**, 1971

NDWALI, Kasereka; NJIRI, Jackson G.; WANJIRU, Evan M. Multi-objective optimal sizing of grid connected photovoltaic batteryless system minimizing the total life cycle cost and the grid energy. **Renewable Energy**, v. 148, p. 1256-1265, 2020.

ONS. Sobre o SIN: O Sistema Em Números. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 12 ago. 2022.

PRĂVĂLIE, R; PATRICHE, C; BANDO, G. Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 692-721, 2019.

PRECIADO, V.H.T; GAYTÁN, M. P; ZERMENO, M.A.T. Dynamic of foreign direct investment in the states of Mexico: An analysis of Markov's spatial chains. **Contaduría y administración**, v. 62, n. 1, p. 163-183, 2017.

REY, S. J. Spatial empirics for economic growth and convergence. **Geographical analysis**, v. 33, n. 3, p. 195-214, 2001.

REY, S. J.; YE, X. Comparative spatial dynamics of regional systems. In: **Progress in spatial analysis**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 441-463.

SCHETTINI, D; AZZONI, C. R.; PAEZ, A. Neighborhood and efficiency in manufacturing in Brazilian regions: a spatial Markov chain analysis. **International Regional Science Review**, v. 34, n. 4, p. 397-418, 2011.

WANG, Y., CHEN, F., WEI, F., YANG, M., GU, X., SUN, Q., WANG, X. Spatial and temporal characteristics and evolutionary prediction of urban health development efficiency in China: Based on super-efficiency SBM model and spatial Markov chain model. **Ecological Indicators**, v. 147, p. 109985, 2023.

6.5 ANEXOS

**ANEXO A - Matriz de Transição da Cadeia Espacial de Markov para Potência (Kw)
Per Capita da GD Fotovoltaica Inserida nos Municípios da Paraíba de 2014 A 2021
– Cálculo com um Desvio Padrão**

A1. Tensão Total

		NAN	LL	L	H	HH
NAN	NAN	0.934	0	0.053	0.007	0.006
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0	0	0
	H	0	0	0	0	0
	HH	0.500	0	0	0.5	0
LL	NAN	0.333	0	0.667	0	0
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0.667	0.222	0.111
	H	0	0	0	0	0
	HH	0	0	0	0	0
L	NAN	0.534	0	0.379	0.056	0.031
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.101	0	0.721	0.135	0.043
	H	0	0	0.536	0.321	0.143
	HH	0.063	0	0.3125	0.250	0.375
H	NAN	0.500	0	0.370	0.111	0.019
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.080	0	0.700	0.180	0.040
	H	0.042	0	0.375	0.417	0.167
	HH	0	0	0.200	0.200	0.600
HH	NAN	0.476	0	0.333	0.119	0.071
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.156	0	0.406	0.344	0.094
	H	0.050	0	0.300	0.350	0.300
	HH	0.071	0	0.214	0.143	0.571

A2. Baixa Tensão

		NAN	LL	L	H	HH
NAN	NAN	0.934	0	37	0.007	0.006
	LL	0	0	0	0	0
	L	4	0	10	1	1.000
	H	3	0	0	1	0
	HH	1.000	0	0	0	0
LL	NAN	0.167	0	0.833	0	0
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0.765	0.176	0.059
	H	0	0	1.000	0	0
	HH	0	0	0.000	1.000	0.000
L	NAN	0.541	0	0.361	0.073	0.025
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.112	0	0.684	0.160	0.037
	H	0	0	0.643	0.179	0.179
	HH	0.059	0	0.294	0.235	0.412
H	NAN	0.500	0	0.321	0.125	0.054
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.059	0	0.647	0.235	0.059
	H	0.069	0	0.345	0.414	0.172
	HH	0	0	0.429	0	0.571
HH	NAN	0.465	0	0.326	0.116	0.093
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.147	0	0.412	0.324	0.118
	H	0	0	0.381	0.333	0.286
	HH	0.105	0	0.158	0.158	0.579

A3. Alta tensão

		NAN	LL	L	H	HH
NAN	NAN	0.975	0	0.015	0.005	0.005
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.333	0	0.5	0.083	0.083
	H	0	0	1	0	0
	HH	0.667	0	0.333	0	0
LL	NAN	1.000	0	0	0	0
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0	0	0
	H	0	0	0	0	0
	HH	0	0	0	0	0
L	NAN	0.884	0	0.085	0	0.030
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.467	0	0.533	0	0
	H	1.000	0	0	0	0
	HH	0.333	0	0.667	0	0
H	NAN	0.963	0	0	0.037	0
	LL	0	0	0	0	0
	L	0.333	0	0.667	0	0
	H	0	0	0	0	0
	HH	0	0	0	0	0
HH	NAN	0.897	0	0.051	0.026	0.026
	LL	0	0	0	0	0
	L	0	0	0	0	0
	H	1.000	0	0	0	0
	HH	0	0	0	0	0

ANEXO B - Probabilidades de um Municípios Permanecer na Mesma Classe, Independentemente de Sua Vizinhança

	NAN	LL	L	H	HH
Total	0.779	0	0.679	0.347	0.500
Baixa tensão	0.779	0	0.649	0.294	0.500
Alta tensão	0.958	0	0.533	0	0

ANEXO C - Resumo das Cadeias Espaciais de Markov Calculadas

	Total	Baixa tensão	Alta tensão
Casos de municípios que poderiam melhorar	1487	1484	1104
Casos de municípios que melhoraram	280	285	36
Probabilidade de melhorar	0.188	0.192	0.033
Casos de municípios com melhores vizinhos	498	499	229
Casos de municípios com melhores vizinhos que melhoraram	207	209	18
Probabilidade de melhorar com vizinhos melhores	0.416	0.419	0.079
Casos de municípios que poderiam piorar	647	647	68
Casos de municípios que pioraram	95	104	22
Probabilidade de piorar	0.147	0.161	0.324
Casos de municípios com piores vizinhos	94	101	21
Casos de municípios com piores vizinhos que pioraram	42	46	13
Probabilidade de piorar com vizinhos piores	0.447	0.455	0.619

7 ARTIGO 6 - ANÁLISE NO ESPAÇO-TEMPO DOS CONGLOMERADOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PARAÍBA, DE 2014 A 2020

RESUMO

A identificação de *clusters* é essencial para gerenciar e otimizar o uso da tecnologia fotovoltaica, levando em conta características locais, identificando *clusters* e avaliando impactos ambientais e sociais. Portanto, este trabalho analisou os conglomerados espaço-temporais das unidades geradoras de Geração Distribuída (GD) fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2020. Os dados utilizados foram fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Atlas Solarimétrico da Paraíba. Foi detectada a presença de *clusters* por meio da estatística de varredura via análise puramente espacial, puramente temporal e espaço-temporal, considerando alto nível de aglomeração. Os resultados mostraram que os *clusters* mais significativos estão no semiárido da Paraíba, nas áreas com elevadas taxas de irradiação horizontal e na região de João Pessoa, como reflexo do seu maior desenvolvimento econômico e pioneirismo no estado. Para o nível de probabilidade de 4,096% da geração de eletricidade da Paraíba ser GD fotovoltaica há 18 *clusters* puramente espaciais, 26 puramente temporais e 20 espaço-temporais. Conclui-se que houve aglomerados no semiárido e região da costa do estado e resultados auxiliam na tomada de decisão e orientação de políticas públicas focadas em Geração Distribuída fotovoltaica.

Palavras-chave: *Clusters*, Estatística Scan, Varredura espaço-temporal, Irradiação solar.

**ARTICLE 6 - SPACE-TIME ANALYSIS OF DISTRIBUTED GENERATION
CONGLOMERATES IN PARAÍBA, FROM 2014 TO 2020**

ABSTRACT

The identification of clusters is essential for managing and optimizing the use of photovoltaic technology, considering local characteristics, identifying clusters, and evaluating environmental and social impacts. Therefore, this study analyzed the spatio-temporal conglomerates of photovoltaic Distributed Generation (DG) generating units in Paraíba from 2014 to 2020. The data used were provided by the National Electric Energy Agency (ANEEL) and the Solarimetric Atlas of Paraíba. The presence of clusters was detected through scanning statistics via purely spatial, purely temporal, and spatio-temporal analysis, considering a high level of agglomeration. The results showed that the most significant clusters are in the semi-arid region of Paraíba, in areas with high rates of horizontal irradiation, and in the João Pessoa region, reflecting its greater economic development and pioneering spirit in the state. For the probability level of 4.096% of Paraíba's electricity generation being photovoltaic DG, there are 18 purely spatial, 26 purely temporal, and 20 spatio-temporal clusters. It is concluded that there were clusters in the semi-arid region and coastal region of the state, and the results help in decision-making and guidance of public policies focused on Distributed Photovoltaic Generation.

Keywords: Clusters, Statistical Scan, Spatio-temporal scanning, Solar irradiation.

7.1 INTRODUÇÃO

O sol é uma esfera formada por gases, emite luz e energia que é recebida na forma de radiação pela Terra. Esta radiação é aproveitada como fonte renovável de eletricidade que busca modelos sustentáveis e eficientes para suprir os desafios da matriz energética (OBAIDEEN et al., 2023). Por sua distribuição de recursos de radiação, esta tecnologia torna-se atrativa por se reabastecer continuamente pela natureza e ser uma fonte acessível em muitas regiões remotas e com pouca infraestrutura (KHANMOHAMMADI et al., 2021; WU et al., 2021).

A fim de atender à crescente demanda por energia no cenário contemporâneo, a geração solar fotovoltaica apresenta-se como uma estratégia energética relevante. Esta energia mais limpa é importante nas práticas relacionadas à economia verde por reduzir os efeitos dos gases do efeito estufa, contribuir para uma evolução energética sustentável e alcançar práticas econômicas mais respeitosas com o meio ambiente (AL-GHUSSAIN et al., 2021; GAO et al., 2022; SUN, 2022).

A energia solar fotovoltaica possui uma contrapartida pertinente na geração elétrica mundial, entre 2017 e 2020 teve destaque sobre as demais fontes energéticas (ZARATE-PEREZ; SEBASTIÁN, 2022). A Agência Internacional de Energias Renováveis - IRENA (2023) mostrou que, em 2022, a capacidade global instalada de energia solar fotovoltaica atingiu cerca de 880 GW. A China detém a posição principal no *ranking* global, com uma capacidade de 392 GW, seguida pelos Estados Unidos da América (111 GW) e Japão (83 GW).

No Brasil, o início da avaliação e avanço da energia fotovoltaica em seu sistema elétrico começou em 2011, com a Chamada de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) número 13 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2011). Essa iniciativa teve intuito de apresentar propostas de arranjos técnicos e comerciais com condições propícias para o desenvolvimento de infraestruturas destinadas à integração desta fonte energética ao sistema elétrico nacional (CARSTENS; CUNHA, 2019). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2022) e a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2022), em 2021, a capacidade instalada da energia solar fotovoltaica no Brasil era de 14,50 GW, com 9,84 GW de geração distribuída - GD e 4,66 GW de geração centralizada.

De acordo com a ANEEL (2022), em 2021, a GD fotovoltaica no Brasil teve 866.510 unidades geradoras em 5.462 municípios do território nacional. Os estados com maior capacidade instalada foram Minas Gerais (1.476 MW), São Paulo (1.063 MW) e Rio Grande do Sul (1.009 MW). No Nordeste, a capacidade instalada foi de 1,8 GW, com

a Bahia no topo do *ranking* nordestino com 363 MW, seguido do Ceará (316 MW) e Pernambuco (275 MW). A Paraíba esteve na sétima posição no Nordeste e 18ª no Brasil, com capacidade de 162,07 MW, distribuídos em 217 municípios e gerados por 12.845 sistemas.

Para avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos distribuídos no estado, a análise espacial aparece para estabelecer critérios quantitativos de dispersão ou agrupamento e sua dependência (CÂMARA et al., 2004; KOZONOGOVA; DUBROVSKAYA, 2020;). Este tipo de análise examina padrões, distribuições e conexões geográficas de fenômenos em um espaço, assim como variáveis distintas se distribuem e interagem neste espaço (HANSEN et al., 2020). A estatística espacial é uma ferramenta para gerenciar e otimizar o uso da tecnologia, considerando as características endoclimáticas de cada local com a identificação de *clusters* e avaliação dos impactos ambientais e sociais. Este tipo de estatística é importante para planejamento e otimização, pois considera os dados distribuídos geograficamente que podem ser padrões de pontos, superfícies contínuas e dados agregados por áreas (CRESSIE; MOORES, 2022; GRIFFITH; PAELINCK, 2011;). A abordagem mais comum para encontrar *clusters* espaciais é a estatística de varredura *Scan*, que é uma técnica de agrupamento, estatisticamente robusta, que mapeia pontos críticos espaciais (XIE et al., 2022). Esta estatística espacial foi mostrada de modo bidimensional por Kulldorff e Nagarwalla (1995) e Kulldorff (1997), em seguida Kulldorff et al. (1998) inserem a variável do tempo na análise que se comporta como uma terceira dimensão, tornando o estudo espaço-temporal.

A estatística de varredura *Scan* revela sua aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento, especialmente no contexto da saúde: Lu et al. (2022) exploraram os padrões espaço-temporais da infecção por SARS-coV-2 na província de Nagasaki no Japão. Firouraghi et al. (2022) analisaram a distribuição da cesariana no Irã nos anos de 2016 a 2020. Siljander et al. (2022) estudaram os padrões de agrupamento espaço-temporal de infecções por COVID-19 na cidade de Helsinque, na Finlândia. Moraes e Gomes (2021) identificaram *clusters* de Covid-19 no mundo e elaborar uma estratégia para vacinação.

No cenário acadêmico, há uma crescente inclinação para a análise de variáveis naturais. Lacerda et al. (2022), por exemplo, empregaram a estatística de varredura para identificar aglomerados espaciais, temporais e espaço-temporais das maiores taxas de incidência de escorpionismo em São Paulo, no período de 2008 a 2018. Costa et al. (2021)

adotaram uma abordagem de previsão de varredura de tempo dinâmica para a velocidade do vento. Coelho Júnior e Santos Júnior (2022) focaram na análise dos conglomerados de bioeletricidade florestal no Brasil. Esses estudos refletem a versatilidade da estatística de varredura em explorar padrões e agrupamentos em diversas áreas de pesquisa.

Esta exploração é inovadora e deve se estabelecer como referencial para investigações futuras, em distintas regiões. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo analisar os conglomerados espaço-temporais dos sistemas de GD fotovoltaica na Paraíba, nos anos de 2014 a 2020. Os resultados obtidos têm uma relevância pela possibilidade de fornecer orientações aos responsáveis pela tomada de decisões nas esferas de políticas públicas locais. Essas informações são importantes para a criação e execução de estratégias sustentáveis na administração da energia em nível regional.

7.2 MATERIAL E MÉTODOS

7.2.1 Objeto de estudo

As unidades geradoras por radiação solar fotovoltaica na Paraíba foram fornecidas pela Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração (SCG/ANEEL), de 2014 a 2020, os dados foram disponibilizados como potência instalada, em quilowatt (kW). As taxas de irradiação global no plano horizontal (GHI) anual, em kWh/m².dia, foram oriundas do Atlas Solarimétrico da Paraíba, desenvolvido pelo Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (CGPDI) do governo do estado, em 2023.

7.2.2 Estatísticas de verificação

A estatística de varredura é um conjunto de métodos que procuram *clusters* no espaço e/ou no tempo (KIANI et al., 2021). Utilizou uma análise puramente espacial, puramente temporal e espaço-temporal para identificar alta conglomeração de instalações de GD fotovoltaica. Para isto, baseou-se no modelo de permutação espaço-temporal e na máxima verossimilhança formulada por Poisson para detectar os aglomerados da GD fotovoltaica na Paraíba, tal qual o estudo de Masrur et al. (2020). A estatística de varredura consiste em uma base geográfica circular, para varredura puramente espacial e altura referente ao tempo que se classifica como janela cilíndrica (ABD NAEIIM; RAHMAN, 2022).

Esta análise não tem dados de populacionais e baseia-se no número de casos e na posição geográfica das instalações geradoras (COELHO JUNIOR; SANTOS JÚNIOR,

2022). Os dados foram agregados de 2014 a 2020 para reduzir o tempo de computação (RANDOLPH, 2017). Para quantificar o total de casos observados, Kulldorff et al. (2005) apresentaram a Equação 7.1 com base no modelo de máxima verossimilhança.

$$C = \sum_z \sum_p C_{zp} \quad (7.1)$$

onde, C_{zp} é a capacidade instalada da geração distribuída fotovoltaica, na coordenada z no período p . Em cada caso, calculou-se a potência esperada de GD fotovoltaica (μ_{zp}) para cada coordenada e período de acordo com a Equação 7.2. Então, potência instalada esperada (μ_A) é a soma dos outros locais inseridos na janela cilíndrica A , como é mostrado na Equação 7.3, e considerou-se que a chance de ter um sistema de GD fotovoltaica dentro da região z foi a mesma para qualquer período analisado.

$$\mu_{zp} = \frac{1}{C} (\sum_z C_{zp}) (\sum_p C_{zp}) \quad (7.2)$$

$$\mu_A = \sum_{(z,p) \in A} \mu_{zp} \quad (7.3)$$

Calculou-se, de acordo com a Equação 7.4, a razão de verossimilhança generalizada de Poisson (RGV). Em relação às janelas espaciais circulares, este trabalho testou a probabilidade da forma de geração fosse de GD fotovoltaica na região z . Então, as análises realizadas foram dos níveis de 1%, 4,086% (participação da GD fotovoltaica na matriz elétrica do Estado da Paraíba), 10%, 25%, 40% e 50%, a fim de identificar os *clusters* mais relevantes. Depois da espacialização, foram mostrados o número de conglomerados para cada nível de probabilidade.

$$RGV = \left(\frac{C_a}{\mu_a} \right) \left(\frac{C - C_a}{C - \mu_A} \right) (C - C_a) \quad (7.4)$$

em que, C a capacidade total instalada da geração distribuída fotovoltaica na Paraíba, nos anos de 2014 a 2020; C_a é a capacidade instalada da geração distribuída fotovoltaica dentro do cilindro A ; μ_a é a capacidade instalada da geração distribuída fotovoltaica total esperada dentro do cilindro A .

Para indicar qual *cluster* possui maior probabilidade de ser verdadeiro, através do RGV maximizado, além dos dados reais, gerou-se e ranqueou-se conjunto de dados de 999 permutações e classificou através da simulação de Monte Carlo. Esta simulação é uma técnica estatística que modela a probabilidade de vários resultados, envolvendo a geração de valores aleatórios para a entrada a fim de analisar a incerteza do sistema (BENALCAZAR; KOMOROWSKA, 2022). Sullivan e Feinn (2012) mostraram que a significância estatística é a probabilidade de que a diferença apresentada entre duas

amostras sejam consequências do acaso, então calculou-se o *p valor* de acordo com Equação 7.5 e utilizou-se nível de significância de 5%, tal qual Rodrigues-Larrad et al (2021).

$$p_{valor} = 1 - \frac{R}{S+1} \quad (7.5)$$

em que, R o conjunto de dados reais; S o conjunto de dados simulados. Nos *clusters* significativos, avaliou-se centroide, raio, valor observado, valor esperado, período, RVG e valor p. Para entender o comportamento dessas variáveis ao longo do tempo, usou a Taxa de Crescimento Geométrico (TGC), Equação 7.6 (SANTOS JUNIOR, 2022).

$$RGG = \left[\sqrt[\Delta t]{\frac{P_f}{P_0}} - 1 \right] \cdot 100 \quad (7.6)$$

em que, P_F = potência instalada (kW) da geração distribuída fotovoltaica no ano final; P_0 = potência instalada (kW) da geração distribuída fotovoltaica no ano inicial; Δt = variação do tempo em anos.

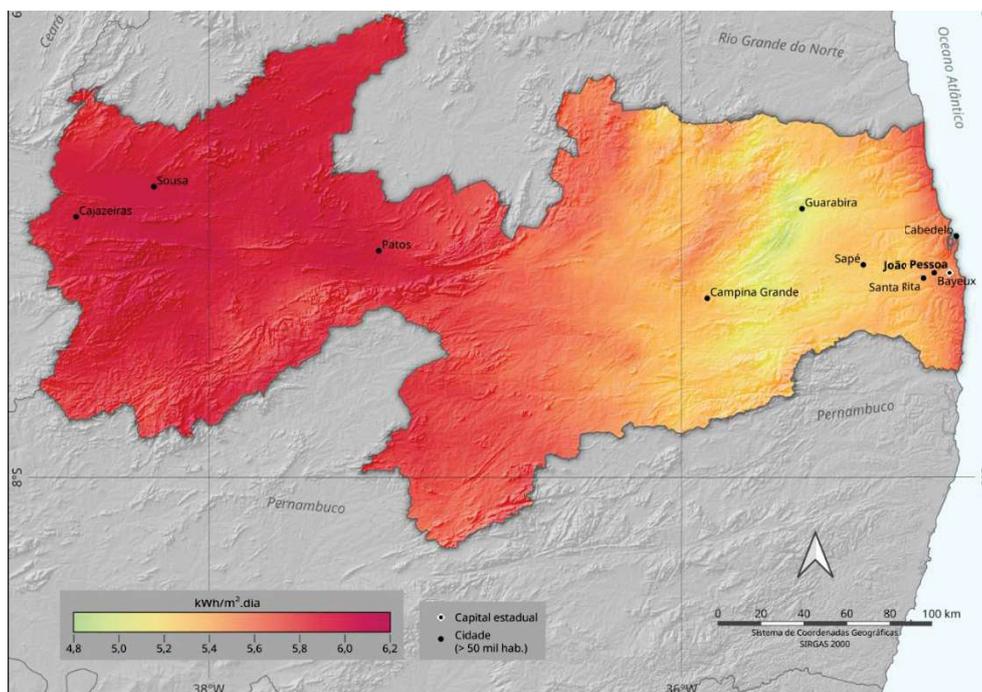
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7.1 mostra a irradiação anual global média no plano horizontal (GHI), em kWh/m².dia, da Paraíba, produzidas por simulações do modelo BRASIL-SR para o período entre janeiro de 2012 a dezembro de 2021. O mapa mostrou maior incidência solar na região semiárida da Paraíba, no oeste do estado, com valores médios de GHI que chegam até 6,2 kWh/m² por dia com melhores valores históricos de irradiação nas regiões intermediárias de Sousa-Cajazeiras e Patos (FERREIRA et al., 2023). A região do brejo da Paraíba, localizada ao leste do estado, apresentou os menores valores de incidência solar, com valores de 5kWh/m² por dia. O valor médio em todo o estado foi superior à média determinada em estudos anteriores, como Pereira et al. (2017), para o território brasileiro (ATLAS SOLARIMÉTRICO DA PARAÍBA, 2023).

A Figura 7.2 mostra os *clusters* puramente espaciais das unidades geradoras de GD fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2020, em relação à probabilidade de 1%, 4,086%, 10%, 25%, 40% e 50% de que a geração de eletricidade da Paraíba é GD fotovoltaica. Os círculos azuis delineiam a extensão dos clusters, enquanto os pontos vermelhos destacam as unidades geradoras contidas dentro desses clusters. Para a probabilidade 1% da geração de eletricidade da Paraíba ser de GD fotovoltaica foram observados 46 clusters puramente espaciais que estavam localizados nas regiões intermediárias: Patos (21), João Pessoa (10), Sousa-Cajazeiras (10) e Campina Grande (5). Para este nível de associação,

observou-se grandes conglomerados de instalações de geração distribuída fotovoltaica, além de alta quantidade de *clusters*, como reflexo da baixa probabilidade analisada, fazendo com que seja mais fácil de identificar um padrão.

Figura 7.1. Irradiação anual global média no plano horizontal (GHI), kWh/m².dia, da Paraíba.



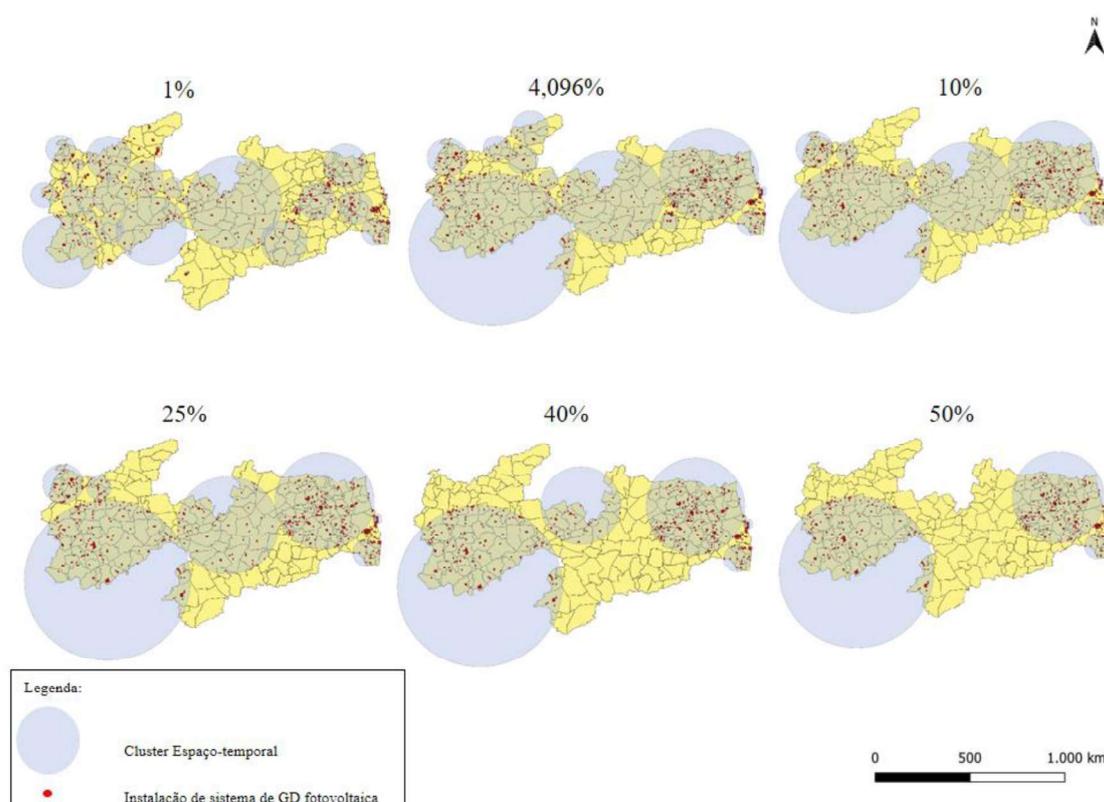
Fonte: Atlas Solarimétrico da Paraíba (2022).

A probabilidade de 4,096% da geração de eletricidade ser proveniente de geração distribuída fotovoltaica refletiu a realidade da participação desse tipo de geração na Paraíba em 2020. Observou-se 18 *clusters* puramente espaciais, dos quais a maior parcela está na região intermediária de João Pessoa (6), seguida Sousa-Cajazeiras (4), Patos (5) e Campina Grande (3). A localização da maior quantidade de *clusters* foi vista no litoral e semiárido do estado, onde há maior incidência de irradiação, tal qual Wang et al. (2019) que também identificaram aglomerados espaciais em decorrência de vantagens naturais. Isto reflete a importância dos aspectos espaciais e temporais no planejamento energético da Paraíba e Brasil.

Na janela probabilística de 10% da geração de eletricidade da Paraíba ser de GD fotovoltaica foram encontrados 14 *clusters* puramente espaciais, assim como Wang et al. (2014) que encontraram a mesma quantidade de aglomerados para análise espaço-temporal. Os centroides dos conglomerados localizaram-se em sua maioria na região

intermediária de João Pessoa (6), em seguida estão as regiões de Campina Grande (3) e Sousa-Cajazeiras (3), por fim, está a região de Patos (2). Em relação à probabilidade de 25% da geração elétrica da Paraíba ser de geração distribuída fotovoltaica, encontrou 10 puramente espaciais. A região intermediária de João Pessoa manteve-se com 6 *clusters*, igualmente à análise anterior, em seguida está a região de Sousa-Cajazeiras (2), Patos (1) e Campina Grande (1).

Figura 7.2. Conglomerados de unidades geradoras de Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba para probabilidade de 1%, 4,086%, 10%, 25%, 40% e 50% de que a geração de eletricidade seja de GD, de 2014 a 2020.



Fonte: Os autores (2024).

Quando considerou a probabilidade de 40% da geração de eletricidade da Paraíba ser de GD fotovoltaica foram observados 8 *clusters* puramente espaciais. Os *clusters* na região intermediária de João Pessoa se manteve com a mesma quantidade de aglomerados, em seguida Patos (2). Já na janela probabilística de que 50% da geração elétrica da Paraíba foi de GD fotovoltaica foram observados 7 *clusters* puramente espaciais, em que os 6 aglomerados da região intermediária de João Pessoa se mantiveram

e Patos com 1 *cluster*. A quantidade dos aglomerados na região intermediária de João Pessoa manteve-se em 6 desde a análise de 4,086% até 50%, por ser a região com maior desenvolvimento econômico do estado com a capital do estado presente. Além disso, Oliveira et al. (2020) concluíram que a implementação de projetos fotovoltaicos na costa Nordeste do Brasil é economicamente viável e pode facilitar o bem-estar social.

À medida que o nível de probabilidade foi reduzido, observou um aumento na quantidade de *clusters* significativos, evidenciando a maior sensibilidade da análise para identificar aglomerados, mesmo quando influenciados pelo acaso. Neste cenário, destacou a persistência dos dois clusters mais significativos, abrangendo a região leste do estado, que engloba o litoral, e a região oeste, caracterizada pelo semiárido. Esses resultados se mantiveram consistentes ao longo de todas as análises. Essa observação assemelhou aos achados de Kiani et al. (2021), que identificaram uma concentração semelhante do uso da tecnologia no leste do Irã. O cluster dominante, situado no semiárido nordestino, refletiu a elevada taxa de irradiação nessa área, atingindo valores médios de 6,2 kWh/m² por dia.

Os conglomerados foram caracterizados com a janela de probabilidade de 4,096% que foi a parcela de energia que se assemelha com a realidade. Na Tabela 7.1 são mostradas as características dos *clusters* puramente espaciais de GD fotovoltaica na Paraíba que são estatisticamente significativos, $p < 0,05$, para a probabilidade de 4,096% ser GD fotovoltaica na geração de eletricidade. O *cluster* 1 teve centroide na cidade de Pirpirituba, localizada na região intermediária de João Pessoa que abrangeu a região de Campina Grande com raio de 64,07 km e RGV de 18.676,33. O alto valor do RGV indica a alta contribuição do *cluster* para a estatística global, sugerindo que a área tem alta incidência de potência instalada. A validação estatística do conglomerado das unidades geradoras de GD fotovoltaica teve média da potência observada de 15,67 kW e média de potência esperada de 637,85 kW. A região intermediária com maior potência foi a região de João Pessoa com 9,98 MW dentro do *cluster*.

O segundo *cluster* teve centroide na cidade de Princesa Isabel com maior raio, 106,96 km e RGV igual a 11.115,09, além de abranger as regiões intermediárias de Patos, Sousa-Cajazeiras e Campina Grande. A potência média observada foi de 7,51 kW e a potência esperada média foi 1.242,18 kW, já a potência dentro do *cluster* em questão foi de 9.329 kW. O *cluster* 3, segundo maior, teve centroide na cidade de Juazeirinho e abrangeu as regiões intermediárias de Campina Grande e Sousa-Cajazeiras, com raio de 65,25 km e RGV igual a 5946,35, a potência média observada foi igual a 26,54 kW, já a

potência esperada foi igual a 96,99 kW e potência que abrange o *cluster* foi igual a 2.543 kW. A Tabela 7.2 apresenta a caracterização dos *clusters* puramente temporais das unidades geradoras de 2014 a 2020, estatisticamente significativos com valor de $p < 0,05$, para a probabilidade de 4,096% da geração de eletricidade na Paraíba ser por GD fotovoltaica.

Tabela 7.15. Caracterização dos clusters puramente espaciais de GD fotovoltaica na Paraíba, 2014-2020.

C	Centroide	R (km)	RGV	OBS. Med	Esp. Med	Potência	p-valor
1	Pirpirituba	64,07	18.676,33	15,67	637,85	9.997	< 0,000000000000000001
2	Princesa Isabel	106,96	11.115,09	7,51	1.242,18	9.329	< 0,000000000000000001
3	Juazeirinho	65,25	5.946,35	26,54	96,99	2.543	< 0,000000000000000001
4	Pedras de Fogo	17,52	3.117,21	20,26	74,49	1.509	< 0,000000000000000001
5	Poço de José de Moura	26,25	2.613,91	8,51	242,12	2.061	< 0,000000000000000001
6	Paulista	19,57	2.473,06	21,80	53,17	1.159	< 0,000000000000000001
7	Santa Rita	3,99	1.140,67	5,40	240,86	1.301	< 0,000000000000000001
8	Bom Sucesso	17,49	1.120,26	26,96	17,81	480	< 0,000000000000000001
9	Queimadas	11,99	1.076,95	4,40	342,69	1.508	< 0,000000000000000001
10	Belém do Brejo do Cruz	23,69	1.029,18	4,63	295,02	1.366	< 0,000000000000000001
11	Cajazeiras	6,45	406,15	2,95	324,93	959	< 0,000000000000000001
12	Cachoeira dos Índios	10,17	347,49	4,32	115,52	499	< 0,000000000000000001
13	Lagoa Seca	1,57	239,30	4,38	77,46	339	< 0,000000000000000001
14	Patos	3,13	214,69	5,20	49,04	255	< 0,000000000000000001
15	Cabedelo	6,47	186,67	1,69	926,13	1.569	< 0,000000000000000001
16	Conde	2,47	80,42	2,81	73,78	207	< 0,000000000000000001
17	Cabedelo	1,11	77,76	1,71	377,68	644	< 0,000000000000000001
18	São José de Piranhas	12,89	75,40	3,06	55,18	169	< 0,000000000000000001

Fonte: Os autores (2024).

O *cluster* 1 foi o mais relevante por ter maior janela temporal, com centroide na cidade de Sousa e localizado na região intermediária de Sousa-Cajazeiras, a sua validação estatística foi de 2018 a 2020, potência instalada observada de 44,68 kW e 44,76 kW esperados. O *cluster* 4 foi o que possuiu a segunda maior janela temporal e centroide na cidade de Sousa, com potência instalada observada de 6 kW e esperada de 70,14. Os *clusters* 2 e 3, ambos com centroide na cidade de João Pessoa e região intermediária de mesmo nome, tiveram janela temporal apenas em 2020 que foi o ano analisado com maior potência instalada. Embora eles terem apenas em um ano, seu valor de RGV foi significativo, refletindo a relevância do mesmo na análise temporal.

Tabela 7.16. Caracterização dos clusters puramente temporais de GD fotovoltaica na Paraíba, no período entre 2014 e 2020.

C	Centroide	Período	RGV	Obs. Med	Esp. Med	Pot	p-valor
1	Sousa	2018-2020	5.665,92	44,68	44,76	2.000	< 0,00000000000000001
2	João Pessoa	2020-2020	874,19	23,65	16,75	396	< 0,00000000000000001
3	João Pessoa	2020-2020	669,05	6,04	114,56	692	< 0,00000000000000001
4	Sousa	2019-2020	404,32	6	70,14	421	< 0,00000000000000001
5	Sousa	2020-2020	260,58	8,94	22,38	200	< 0,00000000000000001
6	Patos	2019-2020	257,56	4,18	91,88	384	< 0,00000000000000001
7	Cabedelo	2019-2019	252,57	9,5	19,57	186	< 0,00000000000000001
8	Cajazeiras	2019-2019	249,34	4,59	73,28	336	< 0,00000000000000001
9	Campina Grande	2019-2019	126,31	7,07	16,25	115	< 0,00000000000000001
10	Catolé do Rocha	2020-2020	116,81	2,35	177	416	< 0,00000000000000001
11	João Pessoa	2016-2016	112,97	11,21	6,69	75	< 0,00000000000000001
12	João Pessoa	2017-2017	65,13	4,15	23,61	98	< 0,00000000000000001
13	Catolé do Rocha	2019-2019	58,72	6,27	9,41	59	< 0,00000000000000001
14	João Pessoa	2019-2019	47,53	17,17	1,46	25	0,00000000000000056
15	Patos	2017-2017	44,77	4,41	14,29	63	0,00000000000000600
16	João Pessoa	2020-2020	39,23	3,11	27,66	86	0,00000000000076000
17	João Pessoa	2019-2019	38,78	2,12	81,49	173	0,0000000000110000
18	João Pessoa	2016-2016	35,20	3,17	23,66	75	0,0000000004400000
19	Campina Grande	2018-2018	34,88	2,37	51,4	122	0,0000000003400000
20	Campina Grande	2019-2019	34,24	2,44	46,23	113	0,0000000005900000
21	Campina Grande	2017-2017	29,02	3,03	21,75	66	0,0000000570000000
22	João Pessoa	2019-2019	26,48	2,84	23,62	67	0,0000000520000000
23	Campina Grande	2019-2019	26,01	1,56	195,08	304	0,0000000790000000
24	Sousa	2018-2018	18,43	2,04	44,67	91	0,00005900000000000
25	Campina Grande	2018-2018	16,43	1,64	94,95	156	0,00034000000000000
26	Cajazeiras	2018-2018	13,11	1,44	150,94	218	0,00610000000000000

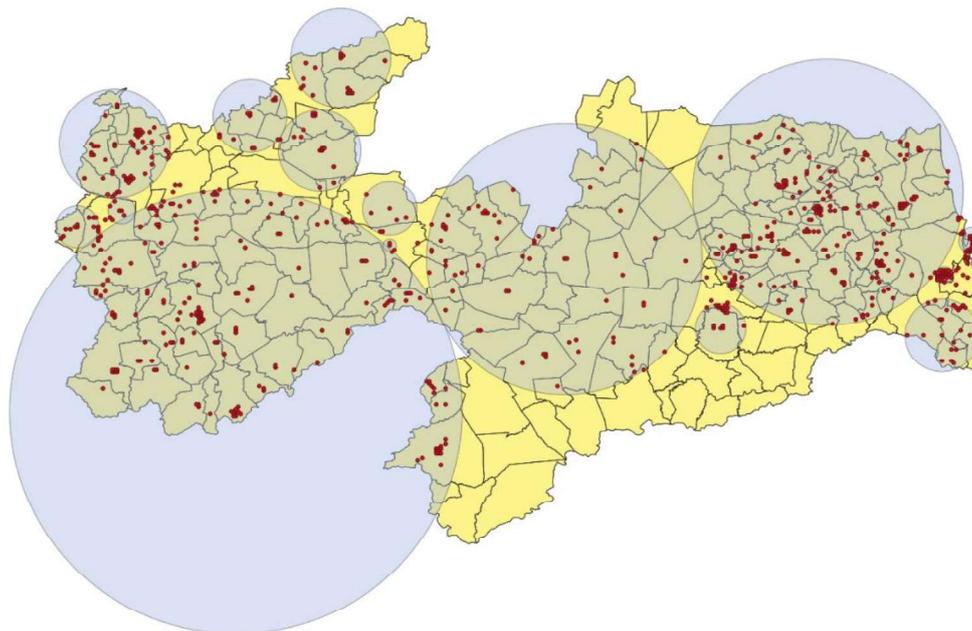
Fonte: Os autores (2024).

O *cluster* 11 esteve presente apenas em 2016 e foi o mais antigo dentro da análise puramente temporal, ele espelha a tendência de aglomerativa na cidade de João Pessoa desde os primeiros anos das instalações de GD fotovoltaica no estado, por ter sido uma das cidades pioneiras do uso da tecnologia no estado. Os *clusters* mais significativos tiveram janela temporal em 2020, por ser o ano de análise mais recente, tal qual Xu e Barba (2021), e haver maior quantidade de novas instalações neste ano, em decorrência de maior conscientização ambiental e a redução dos custos dos sistemas, como consequência do desenvolvimento tecnológico,

Na Figura 7.3 são mostrados os *clusters* espaço-temporais das unidades geradoras fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2020, para a probabilidade de 4,096% da geração de eletricidade ser por GD fotovoltaica. Na Tabela 7.3 são mostradas as características dos

clusters espaço-temporais das unidades geradoras fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2020, estatisticamente significativos com $p < 0,05$ para a probabilidade de 4,096% da geração de eletricidade ser por GD fotovoltaica.

Figura 7.3. Caracterização dos *clusters* espaço-temporais de GD fotovoltaica na Paraíba, no período entre 2014 e 2020.



Fonte: Os autores (2024).

O *cluster* 1 foi o mais relevante dentro da análise espaço-temporal por possuir maior raio e maior janela temporal. Este aglomerado teve centroide na cidade de Princesa Isabel, na região intermediária de Patos e abrangeu as regiões Sousa-Cajazeiras e Campina Grande, tal qual Cuadrado-Matias et al. (2022) que também encontraram alto destaque de um grande *cluster*. Levando em consideração que o estado da Paraíba tem 56.585 km² de área, o *cluster* em questão tem 63% da área total do estado. Isto mostrou a relevância do aglomerado, assim como a expansão tecnológica presente na região intermediária de Patos, região pioneira da GD fotovoltaica no estado, assim como Xu e Barba (2021) que também analisaram um grande aglomerado que foi ponto de entrada para a sua variável no país. Além disso, este *cluster* teve maior RGV, mostrando maior incidência e relevância dentro do estado, foi observada a potência instalada de 8,11 kW e esperou-se potência de 1123,43 kW.

Tabela 7.17. Caracterização dos clusters espaço-temporais de GD fotovoltaica na Paraíba, no período entre 2014 e 2020.

C	Centroide	R (km)	Período	RGV	OBS. Med	Esp. Med	Pot	p-valor
1	Princesa Isabel	106,96	2018-2020	11.455,80	8,11	1.123,43	9.107	< 0.000000000000000001
2	Juazeirinho	65,25	2018-2020	5.765,9023	26,57	93,12	2.474	< 0.000000000000000001
3	Guarabira	59,28	2018-2020	18.625	15,77	630,12	9.939	< 0.000000000000000001
4	Poço de José de Moura	26,25	2018-2020	2.625,6458	8,59	239,71	2.058	< 0.000000000000000001
5	Belém do Brejo do Cruz	25,25	2018-2020	1.034,2261	4,65	293,63	1.366	< 0.000000000000000001
6	Paulista	19,57	2018-2020	2.514,1632	23,31	49,08	1.144	< 0.000000000000000001
7	Bom Sucesso	17,49	2018-2020	1.121,70	27,04	17,75	480,00	< 0.000000000000000001
8	São José de Piranhas	12,89	2020-2020	75,594726	3,25	47,63	155	< 0.000000000000000001
9	Queimadas	11,99	2019-2020	1.411,4786	6,09	237,24	1.445	< 0.000000000000000001
10	Cachoeira dos Índios	10,17	2018-2020	355,05	4,41	113,27	499,00	< 0.000000000000000001
11	Cajazeiras	6,45	2018-2020	421,9249	3,02	317,03	959	< 0.000000000000000001
12	Cacimba de Areia	5,94	2017-2017	116,1197	199,45	0,14	27	< 0.000000000000000001
13	Campina Grande	5,66	2020-2020	73,693419	2,99	57,12	171	< 0.000000000000000001
14	Lucena	4,96	2020-2020	339,0862	20,45	8,02	164	< 0.000000000000000001
15	Conde	4,58	2019-2020	82,76754	2,77	78,21	217	< 0.000000000000000001
16	Santa Rita	3,99	2020-2020	1181,7528	7,05	152,5	1075	< 0.000000000000000001
17	Patos	3,13	2020-2020	242,41686	5,94	42,95	255	< 0.000000000000000001
18	Campina Grande	1,57	2018-2020	249,92427	4,69	70,16	329	< 0.000000000000000001
19	Cabedelo	1,11	2018-2019	301,13014	4,29	101,66	436	< 0.000000000000000001
20	Campina Grande	1,1	2018-2020	216,07126	3,01	165,29	497	< 0.000000000000000001

O conglomerado 2 teve o segundo maior raio e possui centroide na cidade de Juazeirinho, na região intermediária de Campina Grande, mas abrange o nordeste da região de Patos. Este *cluster* também possui maior janela temporal variando de 2018 a 2020, além de alto valor de RGV, 5.765,90, que mostrou alta taxa de incidência esperada. Já o *cluster* 3 foi o que possuiu maior potência, 9,93 MW, dentro da área do aglomerado, ele teve centroide na cidade de Guarabira e envolveu a região intermediária de João Pessoa e leste da região de Campina Grande. Dos 20 *clusters* espaço-temporais, 11 deles tiveram janela temporal de dois anos, variando de 2018 a 2020. O *cluster* 12, que teve centroide na região intermediária de Patos, esteve presente apenas em 2017, sendo o conglomerado mais antigo da análise, por ter centroide em uma das cidades pioneiras no uso desta tecnologia. Cinco conglomerados tiveram janela temporal apenas 2020 e três *clusters* com duração de dois anos, o 19 variou de 2018 a 2019 e os 9 e 14, de 2019 a 2020.

A região intermediária de Patos foi a região com maior quantidade de *clusters*, além de ser a região com o maior *cluster* espaço-temporal. Isto foi consequência do semiárido brasileiro ser economicamente pobre e possuir poucos estudos sobre a região, mas vários investidores foram atraídos para desenvolver a energia renovável na área

(ROMERO et al., 2016). Além disso, Medeiros et al. (2021) mostraram que a temperatura alta é um fator negativo para geração fotovoltaica, pois a saída do módulo é inversamente proporcional à temperatura operacional. No entanto, os autores verificaram que para o semiárido da Paraíba, este fator não é relevante para a geração elétrica, em decorrência da alta taxa de radiação presente na região, tornando a tecnologia favorável no local.

A alta quantidade de *clusters* espaciais, temporais e espaço-temporais pode ser associado a alta e rápida evolução da tecnologia. Isto ocorreu em decorrência dos incentivos governamentais e regulatórios que proporcionaram desenvolvimento tecnológico, como previsto pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2014 (LUNA et al., 2019). Além disso, na Paraíba há isenção de ICMS para equipamentos elétricos para GD desde 2015, incentivando a tecnologia no estado

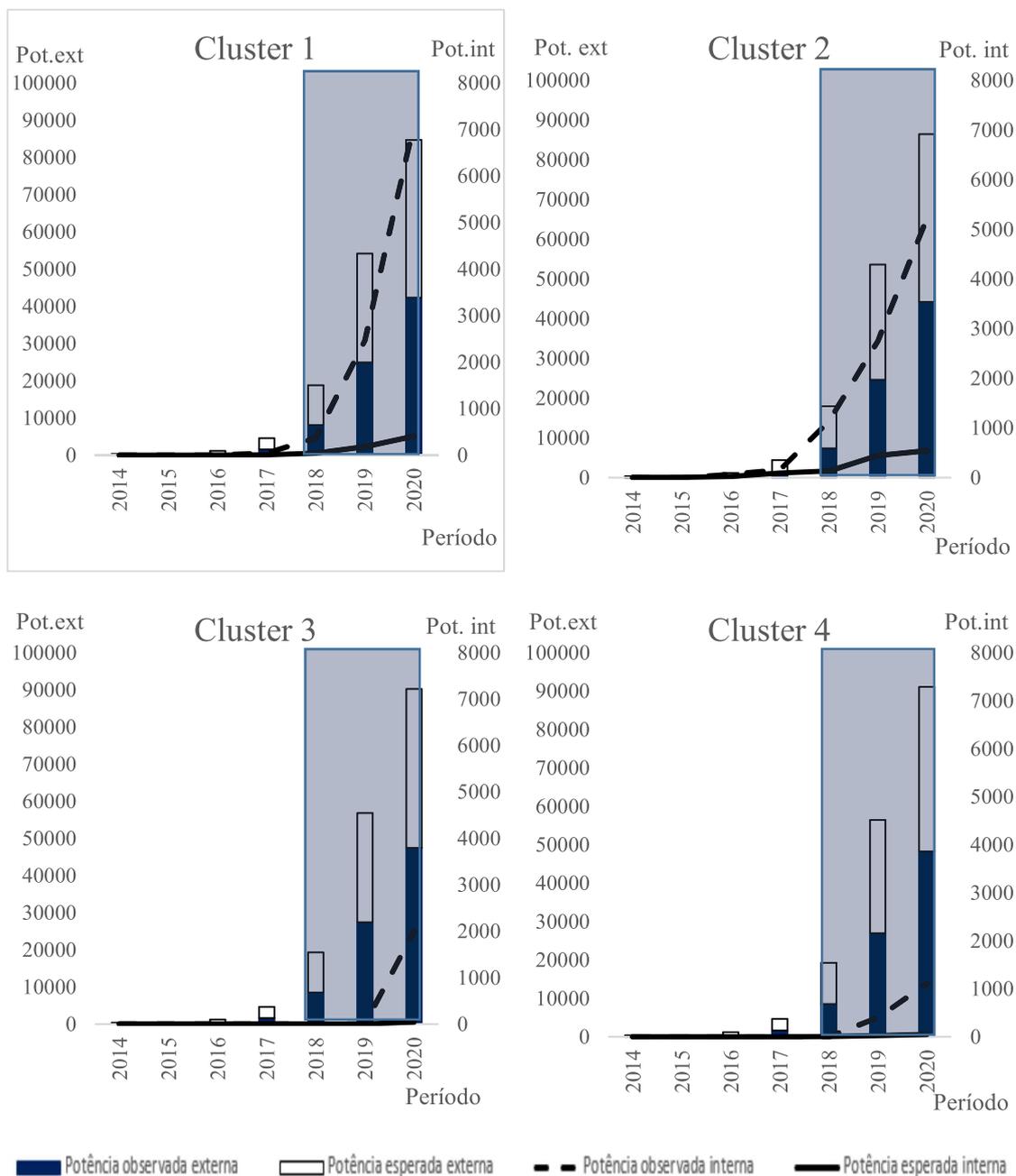
Na Figura 7.4 é mostrada a evolução temporal da potência instalada (kW), observada e esperada, fora (Pot.ext) e dentro (Pot.int) dos principais *clusters* espaço-temporais das unidades de geração distribuída fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2020. No cluster 1, de 2014 a 2020, a potência instalada das unidades geradoras foi de 91,07 MW. Em 2018, com o acréscimo significativo em Sousa (2 MW), Cajazeiras (952 kW) e Pombal (758 kW), a região se transformou no cluster espaço-temporal mais representativo, com potência média esperada de 1.123,43 kW, durante a existência do *cluster* ele passou de potência instalada de 369 kW para 7104 kW, com aumento de 168% a.a., após 2018.

Percebe-se que este conglomerado existe quando houve maior potência observada interna e externa ao *cluster*, isto foi resposta ao grande potencial de produção de energia solar que apresenta o semiárido brasileiro. Este potencial decorre da alta taxa de irradiação solar ao longo do ano que está diretamente ligada à viabilidade econômica do projeto instalado, como mostram Cunha e Pontes (2022). Os resultados encontrados mostram que o *cluster* 1 promoveu desenvolvimento na região do semiárido da Paraíba, devido à alta disseminação da tecnologia que estava ganhando espaço no estado.

O *cluster* 2 também ocorreu de 2018 a 2020 com potência instalada total de 2,47 MW. A potência média observada era de 26,57 kW e a esperada era de 93,12 kW, durante a existência desse conglomerado, a potência instalada observada que variou 66%, indo de 1.134 kW para 5.220 kW. Este *cluster* significativo pode existir em decorrência da alta potência instalada na cidade de Campina Grande (3919,97 kW), Lagoa Seca (149.83 kW), região metropolitana de Campina Grande, e Patos (305,74 kW). Por possuir alta taxa de

potência esperada dentro do *cluster*, 60%, e observada, é possível que tenha havido a disseminação e aumento deste conglomerado, com novas unidades geradoras.

Figura 7.4. Evolução da potência instalada (KiloWatts - kW), observada e esperada, fora (Pot.ext.) e dentro (Pot.int.) de aglomerados de unidades de geração distribuída fotovoltaica na Paraíba, 2014–2020.



Fonte: Os autores (2024).

O *cluster* 3 possuía a mesma janela temporal dos demais, 2018 a 2020, e teve maior potência instalada, 9.939 kW, além de potência observada média de 15,77 kW,

enquanto a potência esperada era de 630 kW. A existência do *cluster* pode ser atribuída à alta potência acrescida em João Pessoa (3461,81 kW) em 2019 e Cabedelo (1715,44 kW), Santa Rita (887,84), Alagoinha (1015,6 kW), Guarabira (712,81) em 2020. Este conglomerado teve tendência de crescimento por estar localizado na região pioneira da instalação de GD fotovoltaica na Paraíba. Além disso, foi a região onde houve maior potência instalada do estado e conter a capital, que é vista como porta de entrada para novas tecnologias.

No quarto *cluster* pode-se ver que ele existiu entre 2018 e 2020, com potência de instalado total de 2.058 kW, potência média observada de 8,59 kW e esperada de 239,71 kW. Este conglomerado esteve localizado no semiárido do Brasil, então possui tendência a crescimento, por sua disponibilidade de recursos com alta taxa de radiação, além de possuir taxa de aumento anual de 66% de potência observada interna ao *cluster* e 150% de aumento a.a de potência esperada, a partir de 2018.

Os clusters de maior relevância compartilharam uma janela temporal entre 2018 e 2020, período em que a potência instalada experimentou um crescimento exponencial, alcançando um aumento significativo e atingindo a marca de 88,53 MW em todo o estado. O notável avanço no uso da tecnologia nesse intervalo reflete a considerável valorização da energia elétrica, decorrente da introdução da "bandeira roxa", uma nova categoria tarifária. Essa mudança elevou o custo de 100 kWh de R\$ 9,49 para R\$ 14,20, impulsionada pela escassez hídrica, conforme destacado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2020. Metade dos *clusters* mais significativos localizaram-se no semiárido da Paraíba por consequência da alta taxa de irradiação nestas regiões, como foi mostrado no Atlas Solarimétrico da Paraíba (2022), que se conectou à viabilidade econômica dos sistemas, pela região do semiárido possuir terra com baixo custo (CUNHA; PONTES, 2022).

7.4 CONCLUSÃO

O uso de estatísticas de varredura neste estudo para avaliou a distribuição das instalações de Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2020. Das unidades analisadas, constatou-se a presença de conglomerados mais expressivos na região do semiárido da Paraíba, nas áreas com elevadas taxas de irradiação horizontal. Essa observação evidenciou a influência determinante das características edafoclimáticas na configuração desses agrupamentos. Também se observou conglomerados relevantes na

região de João Pessoa, como reflexo do seu maior desenvolvimento econômico e pioneirismo no estado

Para a probabilidade de 4,096% da geração de eletricidade da Paraíba ser GD fotovoltaica houve 18 *clusters* puramente espaciais, 26 puramente temporais e 20 espaço-temporais. A alta quantidade de conglomerados associou ao desenvolvimento da tecnologia em decorrência dos incentivos governamentais e regulatórios, além da isenção de ICMS para equipamentos elétricos no estado da Paraíba desde 2015.

Este trabalho contribuiu para a evolução e inovação científica da pesquisa espacial e temporal sobre a Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba. Sendo assim, este artigo pode incentivar o desenvolvimento de políticas públicas com foco nas regiões dos principais *clusters* e em seu entorno para aumentar sua amplitude. Além disso, pode ajudar a embasar estudos sobre a GD fotovoltaica no estado.

A fim de otimizar os resultados encontrados neste trabalho, faz-se necessário o estudo de investigação de conglomerados de GD de outras fontes renováveis no estado para entender as regiões do estado que dominarão a potência instalada. Sendo assim, será possível gerir as estratégias de expansão tecnológica e orientar as políticas públicas no setor.

REFERÊNCIAS

ABD NAEEM, N. S., & RAHMAN, N. A.. Spatio-temporal clustering analysis using two different scanning windows: A case study of dengue fever in Peninsular Malaysia. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, v. 41, p. 100496, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração Distribuída. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empresendimentos-de-geracao-distribuida. Acesso em: 19 abr. 2022.

AGÊNCIA BRASIL. Aneel cria nova bandeira tarifária e conta de luz fica mais cara. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.etc.com.br/economia/noticia/2021-08/aneel-cria-nova-bandeira-tarifaria-e-conta-de-luz-fica-mais-cara>. Acesso em: 06 dez. 2023.

ANEEL – Agência nacional de Energia Elétrica. Chamada Nº 13/2011 Projeto Estratégico: Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração de energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira (2011). Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2011-ChamadaPE13-2011.pdf. Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

ARAÚJO MORAIS, L. R., & SILVA GOMES, G. S. Applying spatio-temporal scan statistics and spatial autocorrelation statistics to identify COVID-19 clusters in the world- a vaccination strategy? *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, v. 39, p. 100461, 2021.

ATLAS SOLAR DA PARAÍBA. POTENCIAL SOLAR NA PARAÍBA. Disponível em: <https://atlassolar.pb.gov.br/atlas-pt/potencial-pt.html>. Acesso em: 06 dez. 2023.

BENALCAZAR, P; KOMOROWSKA, A. Prospects of green hydrogen in Poland: A techno-economic analysis using a Monte Carlo approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 9, p. 5779-5796, 2022.

CÂMARA, G., MONTEIRO, A. M., FUCKS, S. D., & CARVALHO, M. S. Spatial analysis and GIS: a primer. Image Processing Division, National Institute for Space Research (INPE), Brasil, 2004.

CARSTENS, D. D. S, CUNHA, S. K. Sieglinde Kindl. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, p. 396-404, 2019.

CHEN, J., WU, Y., WEN, J., CHENG, S., & WANG, J. Regional differences in China's fossil energy consumption: an analysis for the period 1997–2013. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 578-588, 2017.

COELHO JUNIOR, L. M., SANTOS JÚNIOR, E. P. Space-Time Conglomerates Analysis of the Forest-Based Power Plants in Brazil (2000–2019). **Energies**, v. 15, n. 11, p. 4113, 2022.

COSTA, M. A., RUIZ-CÁRDENAS, R., MINETI, L. B., & PRATES, M. O. Dynamic time scan forecasting for multi-step wind speed prediction. **Renewable Energy**, v. 177, p. 584-595, 2021.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**, New York. 1993.

CRESSIE, N; MOORES, M.T. Spatial statistics. In: Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Cham: **Springer International Publishing**, 2022. p. 1-11.

CUADRADO-MATÍAS, R., CARDOSO, B., SAS, MA, GARCÍA-BOCANEGRA, I., SCHUSTER, I., GONZÁLEZ-BARRIO, D., RUIZ-FONS, F.. Red deer reveal spatial risks of Crimean-Congo haemorrhagic fever virus infection. **Transboundary and Emerging Diseases**, v. 69, n. 4, p. e630-e645, 2022.

CUNHA, D. P., & PONTES, K. V. Desalination plant integrated with solar thermal energy: a case study for the Brazilian semi-arid. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129943, 2022.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. "MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME)." (2016).

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. Dados e estatísticas. 2022. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/painel-de-dados-de-micro-e-minigeracao-distribuida-pdgd->>. Acesso em: 14 jul. 2022.

FERREIRA, M. M., SANTOS, J. A., DA SILVA, L. R., ABRAHAO, R., GOMES, F. D. S. V., & BRAZ, H. D. M. A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind and hybrid generation in Northeast Brazil. **Renewable Energy**, v. 217, p. 119182, 2023.

FIROURAGHI, N., MOHAMMADI, A., HAMER, D. H., BERGQUIST, R., MOSTAFAVI, S. M., SHAMSODDINI, A. & KIANI, B. Spatio-temporal visualisation of cutaneous leishmaniasis in an endemic, urban area in Iran. **Acta Tropica**, v. 225, p. 106181, 2022.

GRIFFITH, D. A.; PAELINCK, J. H. P. Non-standard spatial statistics and spatial econometrics. **Springer Science & Business Media**, 2011.

HANSEN, B. B., GRØTAN, V., HERFINDAL, I., & LEE, A. M. The Moran effect revisited: spatial population synchrony under global warming. **Ecography**, v. 43, n. 11, p. 1591-1602, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2022. Disponível em: < <https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 11 jul. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2022. Disponível em: < <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

KIANI, B., RAOUF RAHMATI, A., BERGQUIST, R., HASHTARKHANI, S., FIROURAGHI, N., BAGHERI, N., MOHAMMADI, A. Spatio-temporal epidemiology of the tuberculosis incidence rate in Iran 2008 to 2018. **Public Health**, v. 21, p. 1-20, 2021.

KHANMOHAMMADI, S., RAHMANI, M., MUSHARAVATI, F., KHANMOHAMMADI, S., BACH, Q. V. Thermal modeling and triple objective optimization of a new compressed air energy storage system integrated with Rankine cycle, PEM fuel cell, and thermoelectric unit. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 43, p. 100810, 2021.

KOZONOGOVA, E; DUBROVSKAYA, J. Assessment of the Features of the Spatial Organization of the Russian Economy Based on the Global and Local Moran Indices. In: Eurasian Economic Perspectives: Proceedings of the 28th Eurasia Business and Economics Society Conference. **Springer International Publishing**, 2020. p. 195.

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., FEUER, E. J., MILLER, B. A., & FREEDMAN, L. S. Breast cancer clusters in the northeast United States: a geographic analysis. **American Journal of Epidemiology**, v. 146, n. 2, p. 161-170, 1997.

KULLDORFF, M., ATHAS, W. F., FEURER, E. J., MILLER, B. A., & KEY, C. R. Evaluating cluster alarms: a space-time scan statistic and brain cancer in Los Alamos, New Mexico. **American Journal of Public Health**, v. 88, n. 9, p. 1377-1380, 1998.

KULLDORFF, M; NAGARWALLA, N. Spatial disease clusters: detection and inference. **Statistics In Medicine**, v. 14, n. 8, p. 799-810, 1995.

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

KULLDORFF, M. Prospective time periodic geographical disease surveillance using a scan statistic. **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)**, v. 164, n. 1, p. 61-72, 2001.

LACERDA, A. B., LORENZ, C., AZEVEDO, T. S., CÂNDIDO, D. M., WEN, F. H., ELOY, L. J., & CHIARAVALLI-NETO, F. Detection of areas vulnerable to scorpionism and its association with environmental factors in São Paulo, Brazil. **Acta tropica**, v. 230, p. 106390, 2022.

LU, Y., CAI, G., HU, Z., HE, F., JIANG, Y., & AOYAGI, K.. Exploring spatiotemporal patterns of COVID-19 infection in Nagasaki Prefecture in Japan using prospective space-time scan statistics from April 2020 to April 2022. **Archives of Public Health**, v. 80, n. 1, p. 1-19, 2022.

LUNA, M. A. R., CUNHA, F. B. F., DE MIRANDA MOUSINHO, M. C. A., & TORRES, E. A.. Solar photovoltaic distributed generation in Brazil: the case of resolution 482/2012. **Energy Procedia**, v. 159, p. 484-490, 2019.

MASRUR, A., YU, M., LUO, W. E DEWAN, A. Space-time patterns, change, and propagation of COVID-19 risk relative to the intervention scenarios in Bangladesh. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 16, p. 5911, 2020.

MEDEIROS, S. E. L., NILO, P. F., SILVA, L. P., SANTOS, C. A. C., CARVALHO, M., & ABRAHÃO, R. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, p. 104331, 2021.

OBAIDEEN, K., OLABI, A. G., AL SWAILMEEN, Y., SHEHATA, N., ABDELKAREEM, M. A., ALAMI, A. H., ... & SAYED, E. T. Solar energy: Applications, trends analysis, bibliometric analysis and research contribution to sustainable development goals (SDGs). **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1418, 2023.

ORDÓÑEZ, Á., SÁNCHEZ, E., ROZAS, L., GARCÍA, R., & PARRA-DOMÍNGUEZ, J.. Net-metering and net-billing in photovoltaic self-consumption: The cases of Ecuador and Spain. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102434, 2022.

OLIVEIRA, L. G., AQUILA, G., BALESTRASSI, P. P., DE PAIVA, A. P., QUEIROZ, A. R., OLIVEIRA PAMPLONA, E., & CAMATTA, U. P. Evaluating economic feasibility and maximization of social welfare of photovoltaic projects developed for the Brazilian northeastern coast: An attribute agreement analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 123, p. 109786, 2020.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de; RÜTHER, R. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José Dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

RANDOLPH, K. D. Using satscantm spatial-scan software with national forest inventory data: A case study in South Carolina. **Mathematics and Computers in Forestry and Natural Resource Sciences**, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, 2017.

RODRÍGUEZ-LARRAD, A., MAÑAS, A., LABAYEN, I., GONZÁLEZ-GROSS, M., ESPIN, A., AZNAR, S., IRAZUSTA, J.. Impact of COVID-19 confinement on physical activity and sedentary behaviour in Spanish university students: role of gender. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 2, p. 369, 2021.

ROMERO, A; CARVALHO, M; MILLAR, D. L. Optimal design and control of wind-diesel hybrid energy systems for remote arctic mines. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 138, n. 6, 2016.

SANTOS JÚNIOR, E. P.; SILVA, M. V. B., SIMIONI, F. J., ROTELLA JUNIOR, P., MENEZES, R. S. C., COELHO JUNIOR, L. M. Location and concentration of the forest bioelectricity supply in Brazil: A space-time analysis. **Renewable Energy**, v. 199, p. 710-719, 2022.

SILJANDER, M.; UUSITALO, R.; PELLIKKA, P.; ISOSOMPPI, S.; VAPALAHTI, O. Spatiotemporal clustering patterns and sociodemographic determinants of COVID-19 (SARS-CoV-2) infections in Helsinki, Finland. **Spat Spatiotemporal Epidemiol.**, v. 41, p. 100493, 2022. DOI: 10.1016/j.sste.2022.100493.

- SULLIVAN, G. M.; FEINN, R. Using effect size—or why the P value is not enough. **Journal of Graduate Medical Education**, v. 4, n. 3, p. 279-282, 2012.
- SUN, Y., GUAN, W., RAZZAQ, A., SHAHZAD, M., & AN, N. B. Transition towards ecological sustainability through fiscal decentralization, renewable energy and green investment in OECD countries. **Renewable Energy**, v. 190, p. 385-395, 2022.
- WANG, J., CAO, Z., ZENG, D. D., WANG, Q., WANG, X., & QIAN, H. Epidemiological analysis, detection, and comparison of space-time patterns of Beijing hand-foot-mouth disease (2008–2012). **PLoS one**, v. 9, n. 3, p. e92745, 2014.
- WANG, Q., KWAN, M. P., FAN, J., ZHOU, K., & WANG, Y. F. A study on the spatial distribution of the renewable energy industries in China and their driving factors. **Renewable Energy**, v. 139, p. 161-175, 2019.
- WATANABE, T; TAKAMATSU, T; NAKAJIMA, T. Y. Evaluation of variation in surface solar irradiance and clustering of observation stations in Japan. **Journal of Applied Meteorology and Climatology** , v. 55, n. 10, pág. 2165-2180, 2016.
- WU, T., QIN, Z., WANG, Y., WU, Y., CHEN, W., ZHANG, S., & HAN, L.. The main progress of perovskite solar cells in 2020–2021. **Nano-Micro Letters**, v. 13, n. 1, p. 1-18, 2021.
- XIE, Y; SHEKHAR, S; LI, Y. Statistically-robust clustering techniques for mapping spatial hotspots: A survey. **Computing Surveys (CSUR)**, v. 55, n. 2, p. 1-38, 2022.
- XU, F; BARBA, K. A comparison of prospective space-time scan statistics and spatiotemporal event sequence based clustering for COVID-19 surveillance. **PLoS One**, v. 16, n. 6, p. e0252990, 2021.
- ZARATE-PERZ, E; SEBASTIÁN, R. Autonomy evaluation model for a photovoltaic residential microgrid with a battery storage system. **Energy Reports**, v. 8, p. 653-664, 2022.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado tem por escopo destacar a relevância da geração distribuída fotovoltaica no contexto energético da Paraíba, notando-se um expressivo crescimento ao longo da última década (2014 a 2021). Após análises chegou as seguintes considerações finais:

Com base no primeiro artigo, realizou-se uma abordagem abrangente da literatura do emprego das energias renováveis globalmente, sob a ótica das políticas públicas, análise espacial e economia circular. Os resultados obtidos propiciam uma visão holística do panorama de desenvolvimento das pesquisas na área e mostrando as lacunas acadêmicas ainda existentes. O tema em questão teve ascensão a partir de 2008, com um acréscimo observado em 2019. A abrangência geográfica das publicações abarca diversas regiões do globo com protagonismo da China, que se mostra como o país com a mais expressiva contribuição no volume de pesquisas. A abordagem da economia circular no setor renovável começou a ser explorada na década de 2020, refletindo a emergência recente desse tema.

O segundo artigo apresentou uma análise regional da GD fotovoltaica no Brasil e mostrou que o índice de concentração de Hoover demonstra um valor médio mais elevado na análise estadual em comparação com a regional, indicando uma concentração significativa de potência em determinadas áreas. Adicionalmente, a análise de Krugman mostra Minas Gerais e a região Sudeste como as referências mais frequentes, mas a potência instalada per capita não exhibe um padrão consistente em relação às referências utilizadas.

No terceiro artigo observou as disparidades regionais da Paraíba em que Quociente Locacional (QL) destacou a relevância dos grupos B1, B2 e B3, sendo esses amplamente difundidos em todo o estado. A análise pelo Índice de Dessimilaridade (SI) revelou que as referências de adoção da tecnologia em questão alinham-se com as regiões previamente determinadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O Índice de Hoover (H) registrou um valor de 0,723 no grupo B1, indicando uma proximidade com um cenário de monopólio nas cidades de Patos e Cabaceiras em 2021. A aplicação do Índice de Ellison-Glaeser (EG) eliminou fatores de aglomeração natural, evidenciando a tendência econômica de crescimento.

No quarto artigo destacou a autocorrelação espacial que os grupos pioneiros (B1 e B3) emergiram como os mais disseminados do Estado, assumindo uma posição de preponderância na capacidade instalada. Também constatou-se que 50% das localidades com as maiores capacidades instaladas correlacionam-se com os mais elevados Produto Interno Bruto (PIB) per capita no estado.

No quinto artigo, as Cadeias de Espaciais de Markov apontaram que os municípios da região do semiárido paraibano apresentaram desempenho superior em comparação com outras localidades, atribuível às condições edafoclimáticas favoráveis e à elevada potência instalada per capita. Também pode ser visto que uma boa vizinhança municipal duplica a probabilidade de melhorar as condições de estado, enquanto uma má vizinhança eleva a probabilidade de piorar de estado em média de 20% para 50%.

No último artigo foi visto que os clusters mais proeminentes estão concentrados no semiárido da Paraíba, em regiões caracterizadas por elevadas taxas de irradiação horizontal, bem como na área circunscrita à região de João Pessoa. Este padrão de distribuição reflete, em parte, o maior desenvolvimento econômico e o pioneirismo desta última região no estado, evidenciando uma relação direta entre as condições socioeconômicas locais e a implementação de tecnologias de geração distribuída fotovoltaica.

De modo geral, esta dissertação oferece suporte substancial para a pesquisa científica no âmbito das análises espaciais da geração distribuída fotovoltaica na Paraíba. Ao indicar as regiões com elevada concentração do uso dessa tecnologia e ao destacar as cidades de referência na sua implementação, este trabalho proporciona uma base sólida para investigações posteriores. Além disso, os resultados apresentados nesta pesquisa têm o potencial de serem utilizados por tomadores de decisão em políticas públicas, considerando a relevância das regiões no estado e identificando os municípios com implementação mais avançada da tecnologia fotovoltaica distribuída.

REFERÊNCIAS

ABD NAEEM, N. S., & RAHMAN, N. A.. Spatio-temporal clustering analysis using two different scanning windows: A case study of dengue fever in Peninsular Malaysia. **Spatial and Spatio-temporal Epidemiology**, v. 41, p. 100496, 2022.

ABDALLA, A. N., JING, W., NAZIR, M. S., JIANG, M., & TAO, H. Socio-economic impacts of solar energy technologies for sustainable green energy: A review. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-38, 2022.

ABDELKADER, Salim Bourchid; HAMIDOUCHE, M.'hamed. Concentration of Economic Activities in the Kingdom of Saudi Arabia. **European Journal of Interdisciplinary Studies**, v. 12, n. 1, p. 15-40, 2020.

ABDO, A. B., BIN, L., ZHANG, X., SAEED, M., QAHTAN, A. S. A., & GHALLAB, H. M. H. Spatial analysis of financial development's effect on the ecological footprint of belt and road initiative countries: Mitigation options through renewable energy consumption and institutional quality. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132696, 2022.

ADAMIAK, C., SZYDA, B., DUBOWNIK, A., & GARCÍA-ÁLVAREZ, D. Airbnb Offer in Spain—Spatial Analysis of the Pattern and Determinants of Its Distribution. **International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 3, p. 155, mar. 2019.

AFTAB, S., IQBAL, M. Z., HAIDER, Z., IQBAL, M. W., NAZIR, G., & SHEHZAD, M. A Bulk photovoltaic effect in 2D materials for solar-power harvesting. **Advanced Optical Materials**, v. 10, n. 23, p. 2201288, 2022.

AGBAITORO, G. A; OYIBO, K. I. Realizing the United Nations Sustainable Development Goals 7 and 13 in sub-Saharan Africa by 2030: synergizing energy and climate justice perspectives. **The Journal of World Energy Law & Business**, v. 15, n. 3, p. 223–235, 1 jun. 2022.

AGÊNCIA BRASIL. **Aneel cria nova bandeira tarifária e conta de luz fica mais cara**. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-08/aneel-cria-nova-bandeira-tarifaria-e-counta-de-luz-fica-mais-cara>. Acesso em: 06 dez. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA Elétrica - ANEEL. Chamada Nº 13/2011 Projeto Estratégico: Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração de energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira (2011). Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2011-ChamadaPE13-2011.pdf. Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração Distribuída. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida. Acesso em: 19 abr. 2022.

AGOVINO, M; CROCIATA, A; SACCO, P.L. Proximity effects in obesity rates in the US: A Spatial Markov Chains approach. **Social Science & Medicine**, v. 220, p. 301-311, 2019.

AGRAWAL, N.; KAPOOR, A.; GUPTA, M. Monthly energy yield assessment of solar photovoltaic system under uniform irradiance and partial shaded condition. **Materials**

Today: Proceedings, v. 68, p. 2699–2704, jan. 2022. DOI: 10.1016/J.MATPR.2022.06.240.

ALDHSHAN, S. R., ABDUL MAULUD, K. N., WAN MOHD JAAFAR, W. S., KARIM, O. A., & PRADHAN, B. Energy Consumption and Spatial Assessment of Renewable Energy Penetration and Building Energy Efficiency in Malaysia: A Review. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9244, jan. 2021.

AL-DOUSARI, A., AL-NASSAR, W., AL-HEMOUD, A., ALSALEH, A., RAMADAN, A., AL-DOUSARI, N., & AHMED, M. Solar and wind energy: Challenges and solutions in desert regions. **Energy**, v. 176, p. 184-194, 2019.

ALMEIDA, E. Econometria espacial. Campinas–SP. Alínea, 2012.

ALYOUSIFI, Yousif et al. Modeling the spatio-temporal dynamics of air pollution index based on spatial Markov chain model. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 1-24, 2020.

AMINI, L., KARNI, E., OUBENALI, M., OUAIFY, H., MBARKI, M., & OUADI, B. Predictive study, using density functional theory and time dependent functional theory, on the structure-property quantification of methylene blue and methyl red dyes for the application in organic solar cells. **Current Chemistry Letters**, v. 13, n. 1, p. 187-198, 2024.

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.

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

ANSELIN, L. Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 83, n. 3, p. 705-710, 2001.

ANSELIN, L., & CHO, W. K. T. Spatial effects and ecological inference. **Political analysis**, v. 10, n. 3, p. 276-297, 2002.

ANSELIN, L., BERA, A. K. Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. **Statistics textbooks and monographs**, v. 155, p. 237-290, 1998.

ARAÚJO, J. E. S., MOURA, K. H. D. L., & ROCHA, R. D. M. **Novas evidências da distribuição espacial das indústrias do nordeste brasileiro: 2005-2010**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

ATLAS SOLAR DA PARAÍBA. POTENCIAL SOLAR NA PARAÍBA. Disponível em: <https://atlassolar.pb.gov.br/atlas-pt/potencial-pt.html>. Acesso em: 06 dez. 2023.

BAI, J., LI, S., KANG, Q., WANG, N., GUO, K., WANG, J., & CHENG, J. Spatial Spillover Effects of Renewable Energy on Carbon Emissions in Less-developed Areas of China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 13, p. 19019–19032, 1 mar. 2022.

BALTA-OZKAN, N.; YILDIRIM, J.; CONNOR, P. M. Regional distribution of photovoltaic deployment in the UK and its determinants: A spatial econometric approach. **Energy Economics**, v. 51, p. 417–429, 1 set. 2015.

- BENALCAZAR, P; KOMOROWSKA, A. Prospects of green hydrogen in Poland: A techno-economic analysis using a Monte Carlo approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 9, p. 5779-5796, 2022.
- BIGERNA, S.; BOLLINO, C. A.; POLINORI, P. Convergence in renewable energy sources diffusion worldwide. **Journal of Environmental Management**, v. 292, p. 112784, 15 ago. 2021.
- BISTLINE, J; SANTEN, N; YOUNG, D. The economic geography of variable renewable energy and impacts of trade formulations for renewable mandates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 106, p. 79-96, 2019.
- BÓDIS, Katalin et al. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109309, 2019.
- BOFFARDI, R; IOPPOLO, G; ARBOLINO, R. A two-step approach to evaluate drivers and barriers to clean energy policies: Italian regional evidence. **Environmental Science & Policy**, v. 120, p. 173-186, 2021.
- BORYSIK, O; BRYCH, V. Post-COVID-19 Revitalisation and Prospects for Climate Neutral Energy Security Technologies. **Problemy Ekorożwoju**, v. 17, n. 2, 2022.
- BRADSHAW, A; MARTINO JANNUZZI, G. Governing energy transitions and regional economic development: Evidence from three Brazilian states. **Energy Policy**, v. 126, p. 1-11, 2019.
- BRIDGE, G., BOUZAROVSKI, S., BRADSHAW, M., & EYRE, N.. Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy. **Energy Policy**, v. 53, p. 331-340, 2013.
- BROCK, A; SOVACOOOL, B.K.; HOOK, A. Volatile photovoltaics: green industrialization, sacrifice zones, and the political ecology of solar energy in Germany. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 111, n. 6, p. 1756-1778, 2021.
- BRUNET, C., SAVADOGO, O., BAPTISTE, P., BOUCHARD, M. A., CHOLEZ, C., ROSEI, F., MERVEILLE, N. Does solar energy reduce poverty or increase energy security? A comparative analysis of sustainability impacts of on-grid power plants in Burkina Faso, Madagascar, Morocco, Rwanda, Senegal and South Africa. **Energy Research & Social Science**, v. 87, p. 102212, 2022.
- BUSU, M. A market concentration analysis of the biomass sector in Romania. **Resources**, v. 9, n. 6, 2020.
- CAI, S., GOU, Z.. Impact of COVID-19 on the energy consumption of commercial buildings: A case study in Singapore. **Energy and Built Environment**, v. 5, n. 3, p. 364-373, 2024.
- CALVERT, K; MABEE, W. More solar farms or more bioenergy crops? Mapping and assessing potential land-use conflicts among renewable energy technologies in eastern Ontario, Canada. **Applied Geography**, v. 56, p. 209-221, 2015.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; FUKS, S. D.; CARVALHO, M. S. Spatial Analysis and GIS: A Primer. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutorials/spatial_analysis/spatial_analysis_primer.pdf, 2017.

- CARPIO-PINEDO, J., ROMANILLOS, G., APARICIO, D., MARTÍN-CARO, M. S. H., GARCÍA-PALOMARES, J. C., & GUTIÉRREZ, J.. Towards a new urban geography of expenditure: Using bank card transactions data to analyze multi-sector spatiotemporal distributions. **Cities**, v. 131, p. 103894, 1 dez. 2022.
- CARSTENS, D. D. S, CUNHA, S. K. Sieglinde Kindl. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, p. 396-404, 2019.
- CASSEY, A. J., SMITH, B. O. Simulating confidence for the Ellison–Glaeser index. **Journal of Urban Economics**, v. 81, p. 85-103, 2014.
- CASTRO-SANTOS, L., LAMAS-GALDO, MI, & FILGUEIRA-VIZOSO, A. Gerenciando os oceanos: Seleção do local de um parque eólico offshore flutuante com base na análise espacial GIS. **Política Marinha** , v. 113, pág. 103803, 2020.
- CAVALCANTE, W. Q. D. F., COELHO, A., & BAIRRADA, C. M. Sustainability and tourism marketing: A bibliometric analysis of publications between 1997 and 2020 using vosviewer software. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4987, 2021.
- CHARUMBIRA, M.; SUNDE, T. Seller concentration in the grain milling industry. **American Journal of Economics and Business Administration**, v. 2, n. 3, p. 247-252, 2010.
- CHEN, I. C., & YANG, B. C. Developing decision model and sustainable mapping to screen the efficiency of brownfield redevelopment based on socioeconomic open data. **Sustainable Environment Research**, v. 32, n. 1, p. 1-19, 2022.
- CHEN, J., WU, Y., WEN, J., CHENG, S., & WANG, J. Regional differences in China's fossil energy consumption: an analysis for the period 1997–2013. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 578-588, 2017.
- CHEN, J., XU, C., LI, K., & SONG, M. A gravity model and exploratory spatial data analysis of prefecture-scale pollutant and CO2 emissions in China. **Ecological Indicators**, v. 90, p. 554-563, 2018.
- CHEN, Y; MIAO, Q; ZHOU, Q. Spatiotemporal Differentiation and Driving Force Analysis of the High-Quality Development of Urban Agglomerations along the Yellow River Basin. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 4, p. 2484, 2022.
- CHEN, Y.; YIN, G.; LIU, K.. Regional differences in the industrial water use efficiency of China: The spatial spillover effect and relevant factors. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105239, 2021.
- CIFUENTES-FAURA, J. European Union policies and their role in combating climate change over the years. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 15, n. 8, p. 1333-1340, 2022.
- CLARK, Stephen D.; REY, Sergio. Temporal dynamics in local vehicle ownership for Great Britain. **Journal of Transport Geography**, v. 62, p. 30-37, 2017.
- CLIFF, A. D.; HAGGETT, P.; ORD, J. K.; VERSEY, G. R. Spatial Diffusion: A Historical Geography of Epidemics in an Island Community. Cambridge University Press, 1981.
- CLIMATE WATCH. HISTORICAL EMISSIONS EXPLORER. Disponível em: <<https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical->

emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=All%20Selected&historical-emissions-sectors=total-including-lucf%2Ctotal-including-lucf&page=1>. Acesso em: <11 de janeiro de 2024>.

COELHO JUNIOR, L. M. Concentração regional do valor bruto de produção do pinhão no Paraná. **Ciência Florestal**, v.26, n.3, p.853-861, jul/set 2016.

COELHO JUNIOR, L. M., & SANTOS JÚNIOR, E. P. Space-Time Conglomerates Analysis of the Forest-Based Power Plants in Brazil (2000–2019). **Energies**, v. 15, n. 11, p. 4113, 2022.

COELHO JUNIOR, L. M., SANTOS JÚNIOR, E. P., BORGES, L. A. C., SILVA, M. L. D.. Specialization and location of the gross value production of native wood products in Paraíba's microrregions (1994–2017). **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 192-204, 2020

COELHO JUNIOR, L. M., SANTOS JUNIOR, E. P. NUNES, A. M. M., DE SOUZA, Á. N., BORGES, L. A. C., SIMIONI, F. J.. Concentration and clusters of black liquor thermoelectric plants in Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 12, p. 2122-2129, 2021.

COELHO JUNIOR, L. M.; MARTINS, K.L.C.; SILVA; Magno, V. B. Spatial convergence of the gross value of production of firewood in the mesoregions of the Brazilian Northeast. **Revista Árvore**, v. 42, 2018.

COELHO JUNIOR, L. M; SANTOS JÚNIOR, E. P. Space-time conglomerates analysis of the forest-based power plants in Brazil (2000–2019). **Energies**, v. 15, n. 11, p. 4113, 2022.

COMMENDATORE, P., KUBIN, I., SUSHKO, I. Big or small? A new economic geography model with an endogenous switch in the market structure. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 161, p. 112257, 2022.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA (CONFAZ). Convênio ICMS nº 101/97. Aprova o regimento do Conselho Nacional de Política Fazendária -CONFAZ. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97> Acesso em 10 fev. 2023.

CORROCHER, N; CAPPA, E. The Role of public interventions in inducing private climate finance: An empirical analysis of the solar energy sector. **Energy Policy**, v. 147, p. 111787, 2020.

CORTÉS-BORDA, D; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G; JIMÉNEZ, L. Solar energy embodied in international trade of goods and services: a multi-regional input–output approach. **Energy**, v. 82, p. 578-588, 2015.

COSTA, E., TEIXEIRA, A. C. R., COSTA, S. C. S., & CONSONI, F. L. Influence of public policies on the diffusion of wind and solar PV sources in Brazil and the possible effects of COVID-19. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, p. 112449, 1 jul. 2022.

COSTA, M. A., RUIZ-CÁRDENAS, R., MINETI, L. B., & PRATES, M. O. Dynamic time scan forecasting for multi-step wind speed prediction. **Renewable Energy**, v. 177, p. 584-595, 2021.

CRESSIE, N. Statistics for spatial data New York. 1993.

CRESSIE, N.; MOORES, M. T. **Spatial statistics**. Preprint disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2105.07216>>. Acesso em: 2023.

CUADRADO-MATÍAS, R., CARDOSO, B., SAS, MA, GARCÍA-BOCANEGRA, I., SCHUSTER, I., GONZÁLEZ-BARRIO, D., & RUIZ-FONS, F.. Red deer reveal spatial risks of Crimean-Congo haemorrhagic fever virus infection. **Transboundary and emerging diseases**, v. 69, n. 4, p. e630-e645, 2022.

CUNHA, D. P., & PONTES, K. V. Desalination plant integrated with solar thermal energy: a case study for the Brazilian semi-arid. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129943, 2022.

DANESE, M; GIOIA, D. Spatial Analysis for Landscape Changes: A Bibliometric Review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, p. 10078, 2021.

DAS, P. K., BHAT, M. Y., & SAJITH, S. Life cycle assessment of electric vehicles: a systematic review of literature. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-17, 2023.

DAVID, T. M.; BUCCIERI, G. P.; SILVA ROCHA RIZOL, P. M. Photovoltaic systems in residences: A concept of efficiency energy consumption and sustainability in brazilian culture. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126836, 2021.

DECEWICZ, A. Regional income disparities in central-eastern europe—a markov model approach. In: The 7th International Days of Statistics and Economics, Prague, 2013.

DI BARI, A. A real options approach to valuate solar energy investment with public authority incentives: The Italian case. **Energies**, v. 13, n. 16, p. 4181, 2020.

DIXON, R., FREEBAIRN, J., & LIM, G. C.. Time-varying equilibrium rates of unemployment: an analysis with Australian data. **Australian Journal of Labour Economics**, v. 10, n. 4, p. 205-225, 2007.

DONG, L., LIANG, H., GAO, Z., LUO, X., & REN, J Spatial distribution of China's renewable energy industry: Regional features and implications for a harmonious development future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1521–1531, 1 maio 2016.

DONTHU, N., KUMAR, S., MUKHERJEE, D., PANDEY, N., & LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021.

DOU, Y., LUO, X., DONG, L., WU, C., LIANG, H., & REN, J.. An empirical study on transit-oriented low-carbon urban land use planning: Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) on Shanghai, China. **Habitat International**, v. 53, p. 379-389, 2016.

DOYLE, G. N. D., JUNIOR, P. R., ROCHA, L. C. S., CARNEIRO, P. F. G., PERUCHI, R. S., JANDA, K., AQUILA, G. Impact of regulatory changes on economic feasibility of distributed generation solar units in Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101660, 2021.

DUNN, L. N., SOHN, M. D., LACOMMARE, K. H., & ETO, J. H. 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.

ĐURAŠKOVIĆ, J; KONATAR, M; RADOVIĆ, M. Renewable energy in the Western Balkans: Policies, developments and perspectives. **Energy Reports**, v. 7, p. 481-490, 2021.

ELAVARASAN, R. M., PUGAZHENDHI, R., JAMAL, T., DYDUCH, J., ARIF, M. T., KUMAR, N. M., NADARAJAH, M. Envisioning the UN Sustainable Development Goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the post-COVID-19 world. **Applied Energy**, v. 292, p. 116665, 2021.

ELLISON, G.; GLAESER, E. L. Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. **Journal of Political Economy**, v. 105, p. 889–927, 1997.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA - EPE,. Dados e estatísticas. 2022. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/painel-de-dados-de-micro-e-minigeracao-distribuida-pdgd->>. Acesso em: 14 jul. 2022.

ENERGISA. NORMA, DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA. **NDU 002-** – Fornecimento de energia elétrica em tensão primária.

ENERGISA. NORMA, DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA. **NDU 015-** Critérios para a conexão de acessantes de centrais geradoras e geração distribuída ao sistema de distribuição para conexão em média tensão.

ERSKINE, M. A., KHOJAH, M., & MCDANIEL, A. E Location selection using heat maps: Relative advantage, task-technology fit, and decision-making performance. **Computers in Human Behavior**, v. 101, p. 151-162, 2019.

ESLAMI, H., NAJEM, S., ABI GHANEM, D., & AHMAD, A. The potential of urban distributed solar energy in transition economies: The case of Beirut city. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112121, 2021.

ESPN. ARENA PERNAMBUCO TERÁ USINA SOLAR PARA COPA DE 2014. Disponível em: http://www.espn.com.br/noticia/278262_arena-pernambuco-tera-usina-solar-para-copa-de-2014. Acesso em: 07 fev. 2024.

FANG, M. M.; ZHOU, W. Greening the road: China's low-carbon energy transition and international trade regulation. **Leiden Journal of International Law**, v. 35, n. 2, p. 357-378, 2022.

FAROOQ, A. S; ZHANG, P. Technical assessment, economic viability, and environmental impact of a solar-driven integrated space and water heating system in various configurations. **Energy for Sustainable Development**, v. 71, p. 330-340, 2022.

FERREIRA, M. M., SANTOS, J. A., DA SILVA, L. R., ABRAHAO, R., GOMES, F. D. S. V., BRAZ, H. D. M. A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind and hybrid generation in Northeast Brazil. **Renewable Energy**, v. 217, p. 119182, 2023.

FERREIRA, M. M., SANTOS, J. A., DA SILVA, L. R., ABRAHAO, R., GOMES, F. D. S. V., & BRAZ, H. D. M. A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind and hybrid generation in Northeast Brazil. **Renewable Energy**, v. 217, p. 119182, 2023.

FIROURAGHI, N., MOHAMMADI, A., HAMER, D. H., BERGQUIST, R., MOSTAFAVI, S. M., SHAMSODDINI, A.; KIANI, B. Spatio-temporal visualisation of cutaneous leishmaniasis in an endemic, urban area in Iran. **Acta Tropica**, v. 225, p. 106181, 2022.

FLORIDA, R.; ADLER, P. Economic geography. In: KOBAYASHI, A. (Ed.). *International Encyclopedia of Human Geography*. Oxford: Elsevier, 2020. p. 25-28.

- FRANCO, M. A.; GROESSER, S. N. A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9615, jan. 2021.
- FRANZ, M; PIRINGER, G. Market development and consequences on end-of-life management of photovoltaic implementation in Europe. **Energy, Sustainability and Society**, v. 10, p. 1-21, 2020.
- FREITAS, W. W., DE SOUZA, R. M., AMARAL, G. J., & DE BASTIANI, F. 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.
- FU, W. J., JIANG, P. K., ZHOU, G. M., & ZHAO, K. L.. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. **Biogeosciences**, v. 11, n. 8, p. 2401-2409, 2014.
- FU, X., YANG, Y., DONG, W., WANG, C., & LIU, Y.. Spatial structure, inequality and trading community of renewable energy networks: A comparative study of solar and hydro energy product trades. **Energy Policy**, v. 106, p. 22-31, 2017.
- FUJITA, M., THISSE, J.F.. New economic geography: an appraisal on the occasion of Paul Krugman's 2008 Nobel Prize in Economic Sciences. **Regional Science and Urban Economics**, v. 39, n. 2, p. 109-119, 2009.
- GASPAR, José M. New economic geography: history and debate. **The European Journal of the History of Economic Thought**, v. 28, n. 1, p. 46-82, 2021.
- GAUTAM, A., SHANKAR, R., VRAT, P.. End-of-life solar photovoltaic e-waste assessment in India: a step towards a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 65-77, 2021.
- GEBARA, C. H.; LAURENT, A. National SDG-7 performance assessment to support achieving sustainable energy for all within planetary limits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 112934, 2023.
- GHAZOUANI, T. Dynamic impact of globalization on renewable energy consumption: Non-parametric modelling evidence. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 185, p. 122115, 2022.
- GIELEN, D., BOSHELL, F., SAYGIN, D., BAZILIAN, M. D., WAGNER, N., & GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, 2019.
- Global Solar Atlas. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Acesso em: 25 out. 2022.
- GOODSTEIN, E; LOVINS, L. H. A pathway to rapid global solar energy deployment? Exploring the solar dominance hypothesis. **Energy Research & Social Science**, v. 56, p. 101197, 2019.
- GOSCHIN, Z., CONSTANTIN, D. L., ROMAN, M., & ILEANU, B. Specialisation and Concentration Patterns in the Romanian Economy. MPRA Paper. Disponível em: <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/88832/>>. Acesso em: 31 out. 2022.
- GRANADOS, J.A.T; SPASH, C. L. Policies to reduce CO2 emissions: Fallacies and evidence from the United States and California. **Environmental Science & Policy**, v. 94, p. 262-266, 2019.

GRIFFITH, D. A.; PAELINCK, J. *Non-Standard Spatial Statistics and Spatial Econometrics*. Berlin, Germany: Springer, 2011.

GRIFFITHS, S.; MILLS, R. Potential of rooftop solar photovoltaics in the energy system evolution of the United Arab Emirates. **Energy Strategy Reviews**, v. 9, p. 1-7, 2016. DOI: 10.1016/j.esr.2015.11.001.

GUAN, Q., AN, H., LI, H., & HAO, X.. The rapid bi-level exploration on the evolution of regional solar energy development. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 465, p. 49–61, 1 jan. 2017.

GULAGI, A., RAM, M., SOLOMON, A. A., KHAN, M., & BREYER, C. Current energy policies and possible transition scenarios adopting renewable energy: A case study for Bangladesh. **Renewable Energy**, v. 155, p. 899-920, 2020.

HADDAD, P. R.; BOISIER, S.; FERREIRA, C. M. C.; ANDRADE, T. A. **Economia Regional: Teorias e Métodos de Análise**. Fortaleza: BNB/ETENE, 1989.

HALAMA, A; MAJOREK, A. Photovoltaic microgeneration (RES) in selected major cities in Silesian Voivodeship. **Economics and Environment**, v. 80, n. 1, p. 109-124, 2022.

HANSEN, B. B., GRØTAN, V., HERFINDAL, I., & LEE, A. M. The Moran effect revisited: spatial population synchrony under global warming. **Ecography**, v. 43, n. 11, p. 1591-1602, 2020.

HE, J., YANG, Y., LIAO, Z., XU, A., & FANG, K.. Linking SDG 7 to assess the renewable energy footprint of nations by 2030. **Applied Energy**, v. 317, p. 119167, 2022.

HE, S.; FANG, C.; ZHANG, W. A geospatial analysis of multi-scalar regional inequality in China and in metropolitan regions. **Applied Geography**, v. 88, p. 199–212, 1 nov. 2017.

HE, Z., KUAI, L., CHEN, X., SHEN, W., & LI, W.. Exploring the spatial pattern of renewable energy technology innovation: evidence from China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 39, p. 59076–59093, 1 ago. 2022.

HERRERA-FRANCO, G., MONTALVAN-BURBANO, N., CARRION-MERO, P., JAYA-MONTALVO, M., & GURUMENDI-NORIEGA, M. Worldwide research on geoparks through bibliometric analysis. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1175, 2021.

HÖFER, T; MADLENER, R. Locational (In) Efficiency of renewable energy feed-in into the electricity grid: A spatial regression analysis. **The Energy Journal**, v. 42, n. 1, 2021.

HOLUJ, A., ILBA, M., LITYŃSKI, P., MAJEWSKI, K., SEMCZUK, M., & SERAFIN, P. Photovoltaic Solar Energy from Urban Sprawl: Potential for Poland. **Energies**, v. 14, n. 24, p. 8576, 2021.

HORNBORG, A; CEDERLÖF, G; ROOS, A. Has Cuba exposed the myth of “free” solar power? Energy, space, and justice. **Environment and planning E: Nature and space**, v. 2, n. 4, p. 989-1008, 2019.

HOSSAIN, M. K.; MENG, Q. A thematic mapping method to assess and analyze potential urban hazards and risks caused by flooding. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 79, p. 101417, 1 jan. 2020.

HU, K., SINHA, A., TAN, Z., SHAH, M. I., & ABBAS, S. Achieving energy transition in OECD economies: Discovering the moderating roles of environmental governance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, p. 112808, 1 out. 2022.

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, 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.

IGLESIAS, C., & VILAÇA, P. On the regulation of solar distributed generation in Brazil: A look at both sides. **Energy Policy**, v. 167, p. 113091, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics. 2021**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-power-generation-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>>. Acesso em: 26 jan. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Data and statistics. 2022**. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

IOANNIDIS, F.; KOSMIDOU, K.; PAPANASTASIOU, D. Public awareness of renewable energy sources and Circular Economy in Greece. **Renewable Energy**, v. 206, p. 1086–1096, 1 abr. 2023.

IONESCU, R. V., ZLATI, M. L., ANTOHI, V. M., SUSANU, I. O., & CRISTACHE, N. A new approach on renewable energy as a support for regional economic development among the European Union. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 184, p. 121998, 2022.

ISLAM, M. T.; HUDA, N.; SAIDUR, R. Current energy mix and techno-economic analysis of concentrating solar power (CSP) technologies in Malaysia. **Renewable Energy**, v. 140, p. 789–806, 2019.

JAEGERSBERG, G.; URE, J. Barriers to knowledge sharing and stakeholder alignment in solar energy clusters: Learning from other sectors and regions. **The Journal of Strategic Information Systems**, v. 20, n. 4, p. 343–354, 2011.

JAIN, A., DAS, P., YAMUJALA, S., BHAKAR, R., & MATHUR, J. Resource potential and variability assessment of solar and wind energy in India. **Energy**, v. 211, p. 118993, 2020.

JANKOWSKA, B.; STALIŃSKI, A.; TRĄPCZYŃSKI, P. Public policy support and the competitiveness of the renewable energy sector – The case of Poland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111235, 1 out. 2021.

JENNICHES, S; WORRELL, E. Regional economic and environmental impacts of renewable energy developments: Solar PV in the Aachen Region. **Energy for Sustainable Development**, v. 48, p. 11-24, 2019.

JESRI, N., SAGHAFIPOUR, A., KOOHPAEI, A., FARZINNIA, B., JOOSHIN, M. K., ABOLKHEIRIAN, S., & SARVI, M. Mapping and spatial pattern analysis of COVID-19 in Central Iran using the Local Indicators of Spatial Association (LISA). **Public Health**, v. 21, p. 1-10, 2021.

JONG, P., DARGAVILLE, R., SILVER, J., UTEMBE, S., KIPERSTOK, A., TORRES, E. A. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid. **Applied Energy**, v. 195, p. 538-555, 2017.

- KAN, A., ZENG, Y., MENG, X., WANG, D., XINA, J., YANG, X., & TESREN, L. The linkage between renewable energy potential and sustainable development: Understanding solar energy variability and photovoltaic power potential in Tibet, China. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, p. 101551, 2021.
- KARATAYEV, M., HALL, S., KALYUZHNOVA, Y., & CLARKE, M. L.. Renewable energy technology uptake in Kazakhstan: Policy drivers and barriers in a transitional economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 120-136, 2016.
- KHANMOHAMMADI, S., RAHMANI, M., MUSHARAVATI, F., KHANMOHAMMADI, S., & BACH, Q. V. Thermal modeling and triple objective optimization of a new compressed air energy storage system integrated with Rankine cycle, PEM fuel cell, and thermoelectric unit. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 43, p. 100810, 2021.
- KIANI, B., RAOUF RAHMATI, A., BERGQUIST, R., HASHTARKHANI, S., FIROURAGHI, N., BAGHERI, N., MOHAMMADI, A. Spatio-temporal epidemiology of the tuberculosis incidence rate in Iran 2008 to 2018. **Public Health**, v. 21, p. 1-20, 2021.
- KILLINGER, S., MAINZER, K., MCKENNA, R., KREIFELS, N., & FICHTNER, W.. A regional optimisation of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives. **Energy**, v. 84, p. 563-574, 2015.
- KI-MOON, Ban. Kyoto Protocol Reference Manual. In: United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC, 2008.
- KIVIRANTA, K., THOMASSON, T., HIRVONEN, J., & TÄHTINEN, M.. Connecting circular economy and energy industry: A techno-economic study for the Åland Islands. **Applied Energy**, v. 279, p. 115883, 1 dez. 2020.
- KOZONOGOVA, E; DUBROVSKAYA, J. Assessment of the Features of the Spatial Organization of the Russian Economy Based on the Global and Local Moran Indices. In: Eurasian Economic Perspectives: Proceedings of the 28th Eurasia Business and Economics Society Conference. **Springer International Publishing**, 2020. p. 195.
- KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 2, p. 259-268, 2007.
- KRUGMAN, P. Geography and Trade. Cambridge: The MIT Press, 1992; Fujita M., Krugman P., Venables A.J. **The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade**, 2001. P. 384.
- KRUGMAN, P. Increasing Returns and Economic Geography. **Journal of Political Economy**, v. 99, p. 483-499, 1991.
- KULLDORFF M; ATHAS W. F; FEURER E. J; MILLER B. A; KEY C. R. Evaluating cluster alarms: a space-time scan statistic and brain cancer in Los Alamos, New Mexico. **American Journal of Public Health**, v. 88, n. 9, p. 1377-1380, 1998.
- KULLDORFF, M. Prospective time periodic geographical disease surveillance using a scan statistic. **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)**, v. 164, n. 1, p. 61-72, 2001.
- KULLDORFF, M. **SaTScan™ user guide for version 9.6**. Disponível em: <<https://www.satscan.org/>>. Acesso em: ano (2018).

- KULLDORFF, M., FEUER, E. J., MILLER, B. A., & FREEDMA, L. S. Breast cancer clusters in the northeast United States: a geographic analysis. **American Journal of Epidemiology**, v. 146, n. 2, p. 161-170, 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.; NAGARWALLA, N. Spatial disease clusters: detection and inference. **Statistics in Medicine**, v. 14, n. 8, p. 799-810, 1995.
- KUMARI, M; SARMA, K; SHARMA, R. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of land surface temperature in relation to land use/cover around a thermal power plant in Singrauli district, Madhya Pradesh, India. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 15, p. 100239, 2019.
- KUZIÖR, A; SIRA, M. A bibliometric analysis of blockchain technology research using VOSviewer. **Sustainability**, v. 14, n. 13, p. 8206, 2022.
- LACERDA, A. B., LORENZ, C., AZEVEDO, T. S., CÂNDIDO, D. M., WEN, F. H., ELOY, L. J., CHIARAVALLÓTI-NETO, F. Detection of areas vulnerable to scorpionism and its association with environmental factors in São Paulo, Brazil. **Acta tropica**, v. 230, p. 106390, 2022.
- LAIMON, M., YUSAF, T., MAI, T., GOH, S., ALREFAE, W.. A systems thinking approach to address sustainability challenges to the energy sector. **International Journal of Thermofluids**, p. 100161, 2022.
- LAN, H., CHENG, B., GOU, Z., & YU, R.. An evaluation of feed-in tariffs for promoting household solar energy adoption in Southeast Queensland, Australia. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101942, 2020.
- LASAGNI, A., SFORZI, F.. Locational determinants of the ICT sector across Italy. Department of Economics, Parma University (Italy), 2007
- LAZARO, L. L. B., SOARES, R. S., BERMANN, C., COLLAÇO, F. M. D. A., GIATTI, L. L., ABRAM, S.. Energy transition in Brazil: Is there a role for multilevel governance in a centralized energy regime?. **Energy Research & Social Science**, v. 85, p. 102404, 2022.
- LE GALLO, J; ERTUR, C. Exploratory spatial data analysis of the distribution of regional per capita GDP in Europe, 1980–1995. **Papers in Regional Science**, v. 82, n. 2, p. 175-201, 2003.
- LEE, C.-C.; WANG, F.; CHANG, Y.-F. Does green finance promote renewable energy? Evidence from China. **Resources Policy**, v. 82, p. 103439, 1 maio 2023.
- LEE, Chien-Chiang et al. How does green finance drive the decarbonization of the economy? Empirical evidence from China. **Renewable Energy**, 2023.
- LEE, J., SHEPLEY, M.M.C.. Benefits of solar photovoltaic systems for low-income families in social housing of Korea: Renewable energy applications as solutions to energy poverty. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101016, 2020.
- LESSER, J. A.; SU, X. Design of an economically efficient feed-in tariff structure for renewable energy development. **Energy Policy**, v. 36, n. 3, p. 981–990, 1 mar. 2008.

- LI, C., LIN, T., CHEN, Y., YAN, Y., & XU, Z. Nonlinear impacts of renewable energy consumption on economic growth and environmental pollution across China. **Journal of Cleaner Production**, v. 368, p. 133183, 25 set. 2022a.
- LI, D; CAI, W. Optimal configuration of photovoltaic energy storage capacity for large power users. **Energy Reports**, v. 7, p. 468-478, 2021.
- LI, J; HUANG, J. The expansion of China's solar energy: Challenges and policy options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 132, p. 110002, 2020.
- LI, L., FAN, Z., FENG, W., YUXIN, C., & KEYU, Q. Coupling coordination degree spatial analysis and driving factor between socio-economic and eco-environment in northern China. **Ecological Indicators**, v. 135, p. 108555, 2022.
- LI, L., TANG, H., LEI, J., & SONG, X. Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park. **Ecological Indicators**, v. 137, p. 108727, 2022.
- LI, Z.; LUAN, R.; LIN, B. The trend and factors affecting renewable energy distribution and disparity across countries. **Energy**, v. 254, p. 124265, 2022.
- LIAN, W., WANG, B., GAO, T., SUN, X., ZHANG, Y., & DUAN, H.. Coordinated Development of Renewable Energy: Empirical Evidence from China. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11122, 2022.
- LIAO, Felix HF; WEI, Yehua Dennis. Dynamics, space, and regional inequality in provincial China: A case study of Guangdong province. **Applied Geography**, v. 35, n. 1-2, p. 71-83, 2012.
- LIMA, L. C; FERREIRA, L. A; MORAIS, F. H. B. L. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 79-85, 2017.
- LIN, B.; HUANG, C. Promoting variable renewable energy integration: The moderating effect of digitalization. **Applied Energy**, v. 337, p. 120891, 2023.
- LIN, X.; TANG, Z.; LONG, H. Spatial and temporal research on ecological total factor energy efficiency in China: Based on “Ecology-Economy-Geography” heterogeneity framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, p. 134143, 2022.
- LIU, Junxia. China's renewable energy law and policy: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 99, p. 212-219, 2019.
- LIU, K., JIA, D., SUN, Y., WEI, C., & GENG, G. Optimal allocation of photovoltaic energy storage on user side and benefit analysis of multiple entities. **Energy Reports**, The 2022 International Symposium on New Energy Technology Innovation and Low Carbon Development. v. 8, p. 1–13, 2022.
- LONG, L., NUCCI, A. The Hoover index of population concentration: A correction and update. **The Professional Geographer**, v. 49, n. 4, p. 431-440, 1997.
- LU, Y., CAI, G., HU, Z., HE, F., JIANG, Y., & AOYAGI, K.. Exploring spatiotemporal patterns of COVID-19 infection in Nagasaki Prefecture in Japan using prospective space-time scan statistics from April 2020 to April 2022. **Archives of Public Health**, v. 80, n. 1, p. 1-19, 2022.
- LUNA, M. A. R., CUNHA, F. B. F., DE MIRANDA MOUSINHO, M. C. A., & TORRES, E. A.. Solar photovoltaic distributed generation in Brazil: the case of resolution 482/2012. **Energy Procedia**, v. 159, p. 484-490, 2019.

- LV, C., BIAN, B., LEE, C. C., HE, Z.. Regional gap and the trend of green finance development in China. **Energy Economics**, v. 102, p. 105476, 2021.
- LV, Z.; LIU, W.; XU, T. Evaluating the impact of information and communication technology on renewable energy consumption: A spatial econometric approach. **Renewable Energy**, v. 189, p. 1–12, 1 abr. 2022.
- MACARTHUR, E; HEADING, H. How the circular economy tackles climate change. **Ellen MacArthur Found**, v. 1, p. 1-71, 2019.
- MADDISON, A. The World Economy. OECD Publishing, Paris, 2007.
- MAGAZZINO, C; MELE, M; MORELLI, G. The relationship between renewable energy and economic growth in a time of Covid-19: a machine learning experiment on the Brazilian economy. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1285, 2021.
- MAGNANI, N; VAONA, A. Regional spillover effects of renewable energy generation in Italy. **Energy Policy**, v. 56, p. 663-671, 2013.
- MAHMOOD, H; ALKHATEEB, T.T.Y; FURQAN, M. Exports, imports, foreign direct investment and CO2 emissions in North Africa: Spatial analysis. **Energy Reports**, v. 6, p. 2403-2409, 2020.
- MALECKI, E. J. Economic Geography. Em: WRIGHT, J. D. (Ed.). International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition). Oxford: Elsevier, 2015. p. 33–37.
- MALIK, K., ROBERTSON, C., ROBERTS, S. A., REMMEL, T. K., & LONG, J. A. Computer vision models for comparing spatial patterns: understanding spatial scale, **International Journal of Geographical Information Science**, 37:1, 1-35, (2023). DOI: 10.1080/13658816.2022.2103562
- MAMAT, R., SANI, M. S. M., & SUDHAKAR, K. J. S. O. T. T. E. Renewable energy in Southeast Asia: Policies and recommendations. **Science of the Total Environment**, v. 670, p. 1095-1102, 2019.
- MARKOV, A. A. Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain. In: HOWARD, R. Dynamic Probabilistic Systems, volume 1: Markov Chains. John Wiley and Sons, 1971. Reprinted in Appendix B.
- MARTINS, K. D. L. D. C., MELQUÍADES, T. F., REZENDE, J. L. P. D., & COELHO JUNIOR, L. M.. Plant extractivism production disparity between Northeast Brazil and Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 25, 2018.
- MASRUR, A., YU, M., LUO, W. E DEWAN, A. Space-time patterns, change, and propagation of COVID-19 risk relative to the intervention scenarios in Bangladesh. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 16, p. 5911, 2020.
- MATHUR, M. Spatial autocorrelation analysis in plant population: An overview. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 7, n. 1, p. 501-513, 2015.
- MATHUR, N.; SINGH, S.; SUTHERLAND, J. W. Promoting a circular economy in the solar photovoltaic industry using life cycle symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104649, 2020.
- MATTEI, T. S. Métodos de Análise Regional: um estudo de localização e especialização para a Região Sul do Brasil. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 38, n. 133, p. 227-243, jul./dez. 2018.

- MEDEIROS, S. E. L., NILO, P. F., SILVA, L. P., SANTOS, C. A. C., CARVALHO, M., & ABRAHÃO, R. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, p. 104331, 2021.
- MENGIST, W., SOROMESSA, T., & LEGESE, G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. **MethodsX**, v. 7, p. 100777, 2020.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **ProGD**: Confirma o Relatório Final do Grupo de Trabalho. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/web/guest/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/progd-confirma-o-relatorio-final-do-grupo-de-trabal-1/pop_up?fbclid=IwAR0zsVUk5YwjR6A0q1dYqr7jqQvqhWfVzF9JboN9_wUr-Zu0IKmRcnNV9oY. Acesso em: 01 dez. 2023.
- MOHAMED, S. A. Application of geo-spatial Analytical Hierarchy Process and multi-criteria analysis for site suitability of the desalination solar stations in Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, v. 164, p. 103767, 1 abr. 2020.
- MOHANTY, S., PATRA, P. K., SAHOO, S. S., & MOHANTY, A.. Forecasting of solar energy with application for a growing economy like India: Survey and implication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 539-553, 2017.
- MOLNÁR, G; ÜRGE-VORSATZ, D; CHATTERJEE, S. Estimating the global technical potential of building-integrated solar energy production using a high-resolution geospatial model. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134133, 2022.
- MONTEIRO, A. M. V., CÂMARA, G., CARVALHO, M. S., & DRUCK, S. Análise espacial e geoprocessamento. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, p. 21-54, 2004.
- MORAIS, L. R. A.; GOMES, G. S. S. Applying Spatio-temporal Scan Statistics and Spatial Autocorrelation Statistics to identify Covid-19 clusters in the world - A Vaccination Strategy? **Spatial and Spatio-temporal Epidemiology**, v. 39, p. 100461, 1 nov. 2021.
- MORAL-MUÑOZ, J. A., HERRERA-VIEDMA, E., SANTISTEBAN-ESPEJO, A., & COBO, M. J. Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. **Profesional de la Información**, v. 29, n. 1, 2020.
- MUKHERJEE, D., LIM, W. M., KUMAR, S., & DONTU, N.. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research. **Journal of Business Research**, v. 148, p. 101-115, 2022.
- MUSIAŁ, W., ZIOŁO, M., LUTY, L., & MUSIAŁ, K.. Energy Policy of European Union Member States in the Context of Renewable Energy Sources Development. **Energies**, v. 14, n. 10, p. 2864, jan. 2021.
- NĂSTASE, G., ȘERBAN, A., DRAGOMIR, G., BREZEANU, A. I., & BUCUR, I.. Photovoltaic development in Romania. Reviewing what has been done. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 523-535, 2018.
- NCHOFOUNG, T. N.; FOTIO, H. K.; MIAMO, C. W. Green taxation and renewable energy technologies adoption: A global evidence. **Renewable Energy Focus**, v. 44, p. 334-343, 1 mar. 2023.

NDWALI, Kasereka; NJIRI, Jackson G.; WANJIRU, Evan M. Multi-objective optimal sizing of grid connected photovoltaic batteryless system minimizing the total life cycle cost and the grid energy. **Renewable Energy**, v. 148, p. 1256-1265, 2020.

NEUPANE, D., KAFLE, S., KARKI, K. R., KIM, D. H., & PRADHAN, P. Solar and wind energy potential assessment at provincial level in Nepal: Geospatial and economic analysis. **Renewable Energy**, v. 181, p. 278-291, 2022.

NIÑEROLA, A.; SÁNCHEZ-REBULL, M.-V.; HERNÁNDEZ-LARA, A.-B. Six Sigma literature: a bibliometric analysis. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 32, n. 9–10, p. 959–980, 2021.

NJOH, A. J., ETTA, S., NGYAH-ETCHUTAMBE, I. B., ENOMAH, L. E., TABREY, H. T., & ESSIA, U. Opportunities and challenges to rural renewable energy projects in Africa: Lessons from the Esaghem Village, Cameroon solar electrification project. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1013–1021, 1 fev. 2019.

NORDHOLM, A; SAREEN, S. Scalar containment of energy justice and its democratic discontents: solar power and energy poverty alleviation. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 3, p. 626683, 2021.

NUNES, A. M. M., COELHO JUNIOR, L. M., ABRAHÃO, R., SANTOS JÚNIOR, E. P., SIMIONI, F. J., ROTELLA JUNIOR, P., & ROCHA, L. C. S. Public Policies for Renewable Energy: A Review of the Perspectives for a Circular Economy. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 485, 2023.

OBAIDEEN, K., OLABI, A. G., AL SWAILMEEN, Y., SHEHATA, N., ABDELKAREEM, M. A., ALAMI, A. H., ... & SAYED, E. T. Solar energy: Applications, trends analysis, bibliometric analysis and research contribution to sustainable development goals (SDGs). **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1418, 2023.

OLANIPEKUN, I. O.; OZKAN, O.; OLASEHINDE-WILLIAMS, G. Is renewable energy use lowering resource-related uncertainties? **Energy**, v. 271, p. 126949, 2023.

OLIVEIRA, L. G., AQUILA, G., BALESTRASSI, P. P., DE PAIVA, A. P., QUEIROZ, A. R., OLIVEIRA PAMPLONA, E., & CAMATTA, U. P. Evaluating economic feasibility and maximization of social welfare of photovoltaic projects developed for the Brazilian northeastern coast: An attribute agreement analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 123, p. 109786, 2020.

OLNER, D., MITCHELL, G., HEPPENSTALL, A., & PRYCE, G. The spatial economics of energy justice: modelling the trade impacts of increased transport costs in a low carbon transition and the implications for UK regional inequality. **Energy Policy**, v. 140, p. 111378, 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Dados e estatística. 2022.** Disponível em: < https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx>. Acesso em: 25 jan. 2023;

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO: **O Sistema Em Números. 2022.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 12 ago. 2022.

ORDÓÑEZ, Á., SÁNCHEZ, E., ROZAS, L., GARCÍA, R., & PARRA-DOMÍNGUEZ, J.. Net-metering and net-billing in photovoltaic self-consumption: The cases of Ecuador and Spain. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102434, 2022.

O'SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. Putting Maps Together – Map Overlay. In: **Geographic Information Analysis**. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 2010. p. 315–340.

OWEN, A. D. Environmental externalities, market distortions and the economics of renewable energy technologies. **The Energy Journal**, v. 25, n. 3, 2004.

OZOEGBU, C. G.; AKPAN, P. U. A review and appraisal of Nigeria's solar energy policy objectives and strategies against the backdrop of the renewable energy policy of the Economic Community of West African States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, p. 110887, 2021.

PAPAGEORGIU, K., CARVALHO, G., PAPAGEORGIU, E. I., BOCHTIS, D., & STAMOULIS, G. Decision-Making Process for Photovoltaic Solar Energy Sector Development using Fuzzy Cognitive Map Technique. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1427, jan. 2020.

PARAÍBA. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. **Produto interno bruto dos municípios do estado da Paraíba: Resultados 2020**. Disponível em: https://paraiba.pb.gov.br/diretas/secretaria-de-planejamento-orcamento-e-gestao/arquivos/pib-municipios/produto-interno-bruto-dos-municipios-do-estado-da-paraiba_resultados-2020.pdf. Acesso em: 01 dez. 2023.

PASCALE, A., ARBOLINO, R., SZOPIK-DEPCZYŃSKA, K., LIMOSANI, M., & IOPPOLO, G. A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. **Journal Of Cleaner Production**, v. 281, p. 124942, 2021.

PATWA, N., SIVARAJAH, U., SEETHARAMAN, A., SARKAR, S., MAITI, K., & HINGORANI, K. Towards a circular economy: An emerging economies context. **Journal of Business Research**, v. 122, p. 725-735, 2021.

PEIDONG, Z., YANLI, Y., JIN, S., YONGHONG, Z., LISHENG, W., & XINRONG, L. Opportunities and challenges for renewable energy policy in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 439-449, 2009.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José Dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

PIACENTI, C.A., ALVES, L.R., LIMA, J.F.. O perfil locacional do emprego setorial no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 39, n. 3, p. 482-502, 2008.

PIRES, A. L. G., ROTELLA JUNIOR, P., MORIOKA, S. N., ROCHA, L. C. S., & BOLIS, I. Main trends and criteria adopted in economic feasibility studies of offshore wind energy: **A Systematic Literature Review**. **Energies**, v. 15, n. 1, p. 12, 2021.

POSSAS, M. L. **Estruturas de mercado em oligopólio: economia e planejamento**. 2. ed. São Paulo: Hucitec, 1999. 191p.

POURASL, H. H., BARENJI, R. V., & KHOJASTEHNEZHAD, V. M. energy status in the world: A comprehensive review. **Energy Reports**, v. 10, p. 3474-3493, 2023.

PRĂVĂLIE, Remus; PATRICHE, Cristian; BANDOC, Georgeta. Spatial assessment of solar energy potential at global scale. **A geographical approach**. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 692-721, 2019.

PRECIADO, V.H.T; GAYTÁN, M.P; ZERMENO, M A. T. Dynamic of foreign direct investment in the states of Mexico: An analysis of Markov's spatial chains. **Contaduría y administración**, v. 62, n. 1, p. 163-183, 2017.

QIAN, X., BAI, Y., HUANG, W., DAI, J., LI, X., WANG, Y.. Fuzzy Technique Application in Selecting Photovoltaic Energy and Solar Thermal Energy Production in Belt and Road Countries. **Journal of Energy Storage**, v. 41, p. 102865, 1 set. 2021.

RAMIREZ CAMARGO, L.; STOEGLEHNER, G. Spatiotemporal modelling for integrated spatial and energy planning. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 32, 16 out. 2018.

RANDOLPH, K. D. Using satscantm spatial-scan software with national forest inventory data: A case study in South Carolina. **Mathematics and Computers in Forestry and Natural Resource Sciences**, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, 2017.

Relação de empreendimentos de Geração Distribuída - Dados Abertos - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>. Acesso em: 28 out. 2022.

RENOU-MAISSANT, P; ABDESSELAM, R; BONNET, J. Trajectories for Energy Transition in EU-28 Countries over the Period 2000–2019: a Multidimensional Approach. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 27, n. 3, p. 525-551, 2022.

RESENDE, M., WYLLIE, R.. Aglomeração industrial no Brasil: um estudo empírico. **Estudos Econômicos**, v. 35, p. 433-460, 2005.

Resolução normativa ANEEL. nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2022.

Resolução normativa ANEEL. nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2022.

REY, S. J. Spatial empirics for economic growth and convergence. **Geographical analysis**, v. 33, n. 3, p. 195-214, 2001.

REY, S. J.; YE, X. Comparative spatial dynamics of regional systems. In: **Progress in spatial analysis**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 441-463.

RODRÍGUEZ-LARRAD, A., MAÑAS, A., LABAYEN, I., GONZÁLEZ-GROSS, M., ESPIN, A., AZNAR, S., IRAZUSTA, J.. Impact of COVID-19 confinement on physical activity and sedentary behaviour in Spanish university students: role of gender. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 2, p. 369, 2021.

ROGERSON, P.A., PLANE, D.A. The Hoover index of population concentration and the demographic components of change: An article in memory of Andy Isserman. **International Regional Science Review**, v. 36, n. 1, p. 97-114, 2013.

ROMERO, A; CARVALHO, M; MILLAR, D. L. Optimal design and control of wind-diesel hybrid energy systems for remote arctic mines. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 138, n. 6, 2016.

RONZON, T., PIOTROWSKI, S., TAMOSIUNAS, S., DAMMER, L., CARUS, M., & M'BAREK, R.. Developments of economic growth and employment in bioeconomy sectors across the EU. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4507, 2020.

- ROTELLA JUNIOR, P., ROCHA, L. C. S., MORIOKA, S. N., BOLIS, I., CHICCO, G., MAZZA, A., JANDA, K.. Economic Analysis of the Investments in Battery Energy Storage Systems: Review and Current Perspectives. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2503, jan. 2021.
- SAHOO, S., ZUIDEMA, C., VAN STRALEN, J. N., SIJM, J., & FAAIJ, A. Detailed spatial analysis of renewables' potential and heat: A study of Groningen Province in the northern Netherlands. **Applied Energy**, v. 318, p. 119149, 15 jul. 2022.
- SAIDANI, M., YANNOU, B., LEROY, Y., CLUZEL, F., & KENDALL, A.. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542-559, 2019.
- SAIDI, K; MBAREK, M. Ben. Nuclear energy, renewable energy, CO2 emissions, and economic growth for nine developed countries: Evidence from panel Granger causality tests. **Progress in Nuclear Energy**, v. 88, p. 364-374, 2016.
- SAMPAIO, P.G.V., GONZÁLEZ, M.O.A.. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.
- SANTOS JÚNIOR, E. P. , DA SILVA, M. V. B., SIMIONI, F. J., ROTELLA JUNIOR, P., MENEZES, R. S. C., COELHO JUNIOR, L. M. Location and concentration of the forest bioelectricity supply in Brazil: A space-time analysis. **Renewable Energy**, v. 199, p. 710-719, 2022.
- SANTOS JÚNIOR, E. P., MARTINS, K. D. L. D. C., DA SILVA, M. V. B., MAURÍCIO, C. F. B., MENEZES, R. S. C., & COELHO JUNIOR, L. M.. Forest Bioelectricity in Brazil: Distribution and Spatial-Time Dependence. **IEEE Access**, v. 10, p. 132822-132835, 2022.
- SANTOS, A. J. L.; LUCENA, A. F. P. Climate change impact on the technical-economic potential for solar photovoltaic energy in the residential sector: a case study for Brazil. **Energy and Climate Change**, v. 2, p. 100062, 1 dez. 2021.
- SAWHNEY, A; RAHUL, M. Examining the regional pattern of renewable energy CDM power projects in India. **Energy Economics**, v. 42, p. 240-247, 2014.
- SCARAMUZZINO, C.; GAREGNANI, G.; ZAMBELLI, P. Integrated approach for the identification of spatial patterns related to renewable energy potential in European territories. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 1–13, 1 mar. 2019.
- SHELL, K. R.; CLARO, J; FISCHBECK, P. Geographic attribution of an electricity system renewable energy target: Local economic, social and environmental tradeoffs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 884-902, 2015.
- SCHETTINI, D; AZZONI, C. R.; PAEZ, A. Neighborhood and efficiency in manufacturing in Brazilian regions: a spatial Markov chain analysis. **International Regional Science Review**, v. 34, n. 4, p. 397-418, 2011.
- SCHUNDER, T., YIN, D., BAGCHI-SEN, S., & RAJAN, K. A spatial analysis of the development potential of rooftop and community solar energy. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 19, p. 100355, 1 ago. 2020.
- SEHNEM, S., NDUBISI, N. O., PRESCHLAK, D., BERNARDY, R. J., & SANTOS JUNIOR, S. Circular economy in the wine chain production: maturity, challenges, and lessons from an emerging economy perspective. **Production Planning & Control**, v. 31, n. 11–12, p. 1014–1034, 9 set. 2020.

SEVERIANO, C. A., E SILVA, P. C. D. L., COHEN, M. W., & GUIMARÃES, F. G.. Evolving fuzzy time series for spatio-temporal forecasting in renewable energy systems. **Renewable Energy**, v. 171, p. 764–783, 1 jun. 2021.

SHAHNAZI, R; SHABANI, Z. D. Do renewable energy production spillovers matter in the EU?. **Renewable Energy**, v. 150, p. 786-796, 2020.

SHAHSAVARI, A.; AKBARI, M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 275–291, 1 jul. 2018.

SHARMA, A.; BANERJEE, R. Framework to analyze the spatial distribution of the labor impacts of clean energy transitions. **Energy Policy**, v. 150, p. 112158, 1 mar. 2021.

SHENG, M. S., SREENIVASAN, A. V., SHARP, B., & DU, B. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions and energy consumption for electric vehicles: A comparative study in Oceania. **Energy Policy**, v. 158, p. 112552, 2021.

SHRESTHA, A., MUSTAFA, A. A., HTIKE, M. M., YOU, V., KAKINAKA, M. Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. **Renewable Energy**, v. 199, p. 419–432, 1 nov. 2022.

SILJANDER, M., UUSITALO, R., PELLIKKA, P., ISOSOMPPI, S., & VAPALAHTI, O. Spatiotemporal clustering patterns and sociodemographic determinants of COVID-19 (SARS-CoV-2) infections in Helsinki, Finland. **Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology**, v. 41, p. 100493, 2022.

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

SIMPSON, G.; CLIFTON, J. Subsidies for residential solar photovoltaic energy systems in Western Australia: Distributional, procedural and outcome justice. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 262–273, 1 nov. 2016.

SINIČÁKOVÁ, Marianna; ŠTIBLÁROVÁ, Ľubica. Regional Aspects of Business Cycle Synchronization in the V4 Countries. **Editorial Board**, v. 11, n. 2, p. 40, 2016.

SONG, X., CHEN, X., YE, M., DAI, Z., HAMMOND, G., & ZACHARA, J. M.. Delineating Facies Spatial Distribution by Integrating Ensemble Data Assimilation and Indicator Geostatistics With Level-Set Transformation. **Water Resources Research**, v. 55, n. 4, p. 2652–2671, 2019.

SOVACOOOL, B. K., BARNACLE, M. L., SMITH, A., & BRISBOIS, M. C.. Towards improved solar energy justice: Exploring the complex inequities of household adoption of photovoltaic panels. **Energy Policy**, v. 164, p. 112868, 1 maio 2022.

STATISTICS TIME SERIES. Disponível em: <<https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>>. Acesso em: 25 out. 2022.

STEEVES, G. M.; PETTERINI, F. C.; MOURA, G. V. The interiorization of Brazilian violence, policing, and economic growth. **Economia**, v. 16, n. 3, p. 359–375, 1 set. 2015.

STEVOVIC, I., MIRJANIC, D., & PETROVIC, N Integration of solar energy by nature-inspired optimization in the context of circular economy. **Energy**, v. 235, p. 121297, 2021.

- SUCHEK, N., FERNANDES, C. I., KRAUS, S., FILSER, M., & SJÖGRÉN, H.. Innovation and the circular economy: A systematic literature review. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 3686-3702, 2021.
- SULLIVAN, G. M.; FEINN, R. Using effect size—or why the P value is not enough. **Journal of Graduate Medical Education**, v. 4, n. 3, p. 279-282, 2012.
- SUN, Y., GUAN, W., RAZZAQ, A., SHAHZAD, M., & AN, N. B. Transition towards ecological sustainability through fiscal decentralization, renewable energy and green investment in OECD countries. **Renewable Energy**, v. 190, p. 385-395, 2022.
- SUPERINTENDÊNCIA DOS DESPORTOS DO ESTADO DA BAHIA - SUDESB. Política Pública. Disponível em: <http://www.sudesb.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=18>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2024.
- SYMANZIK, J. Exploratory spatial data analysis. In: **Handbook of Regional Science**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 1295-1310.
- TAKAHASHI, T. On the economic geography of an aging society. **Regional Science and Urban Economics**, v. 95, p. 103798, 1 jul. 2022.
- TANG, Z., SUN, G., FU, M., WEN, C., & PLENKOVIĆ-MORAJ, A.. Research on the industrial energy eco-efficiency evolution characteristics of the Yangtze River Economic Belt in the temporal and spatial dimension, china. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 1, p. 268, 2020.
- TÖBBEN, J. Regional net impacts and social distribution effects of promoting renewable energies in Germany. **Ecological Economics**, v. 135, p. 195-208, 2017.
- TORTORELLA, G. L.; FOGLIATTO, F. S.; SAURIN, T. A.; TONETTO, L. M.; MCFARLANE, D. Contributions of Healthcare 4.0 digital applications to the resilience of healthcare organizations during the COVID-19 outbreak. **Technovation**, v. 111, p. 102379, 2022.
- TSAI, P. J., & PERNG, C. H. Spatial autocorrelation analysis of 13 leading malignant neoplasms in Taiwan: a comparison between the 1995-1998 and 2005-2008 periods. **Health**, v. 3, n. 12, p. 712, 2011.
- UN [United Nations] General Assembly. 2015. **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. A/RES/70/1. http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E. Acesso em: 01 mar. 2023.
- VAN OPSTAL, W., SMEETS, A.. Circular economy strategies as enablers for solar PV adoption in organizational market segments. **Sustainable Production and Consumption**, v. 35, p. 40-54, 2023.
- WAIGANJO, M.; GODINIC, D.; OBRENOVIC, B. Strategic planning and sustainable innovation during the COVID-19 pandemic: a literature review. **International Journal of Innovation and Economic Development**, v. 7, n. 5, p. 52-59, 2021.
- WANG, C., FENG, K., LIU, X., WANG, P., CHEN, W. Q., & LI, J. Looming challenge of photovoltaic waste under China's solar ambition: A spatial-temporal assessment. **Applied Energy**, v. 307, p. 118186, 2022.

- WANG, H.W.; DODD, A; KO, Y. Resolving the conflict of greens: A GIS-based and participatory least-conflict siting framework for solar energy development in southwest Taiwan. **Renewable Energy**, v. 197, p. 879-892, 2022.
- WANG, J., CAO, Z., ZENG, D. D., WANG, Q., WANG, X., & QIAN, H. Epidemiological analysis, detection, and comparison of space-time patterns of Beijing hand-foot-mouth disease (2008–2012). **PLoS one**, v. 9, n. 3, p. e92745, 2014.
- WANG, K. H., LIU, L., ZHONG, Y., & LOBONT, O. R.. Economic policy uncertainty and carbon emission trading market: A China's perspective. **Energy Economics**, v. 115, p. 106342, 2022.
- WANG, K., ZHAO, X., PENG, B., & ZENG, Y. Spatio-temporal pattern and driving factors of municipal solid waste generation in China: New evidence from exploratory spatial data analysis and dynamic spatial models. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 121794, 2020.
- WANG, Q., KWAN, M. P., FAN, J., ZHOU, K., & WANG, Y. F. A study on the spatial distribution of the renewable energy industries in China and their driving factors. **Renewable Energy**, v. 139, p. 161-175, 2019.
- WANG, Y., CHEN, F., WEI, F., YANG, M., GU, X., SUN, Q., & WANG, X. Spatial and temporal characteristics and evolutionary prediction of urban health development efficiency in China: Based on super-efficiency SBM model and spatial Markov chain model. **Ecological Indicators**, v. 147, p. 109985, 2023.
- WATANABE, T; TAKAMATSU, T; NAKAJIMA, T. Y. Evaluation of variation in surface solar irradiance and clustering of observation stations in Japan. **Journal of Applied Meteorology and Climatology** , v. 55, n. 10, pág. 2165-2180, 2016.
- WAZZAN, K.. The spatial distribution of the basic education schools in Lattakia City (Syria). **Journal of Educational and Social Research**, v. 7, n. 1, p. 71-71, 2017.
- WEBER, A.. **Theory of the location of industries**. Chicago, The University of Chicago Press, 1929. 256 p.
- 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.
- WU, T., QIN, Z., WANG, Y., WU, Y., CHEN, W., ZHANG, S., & HAN, L.. The main progress of perovskite solar cells in 2020–2021. **Nano-Micro Letters**, v. 13, n. 1, p. 1-18, 2021.
- XIAO, Y., & WATSON, M.. Guidance on conducting a systematic literature review. **Journal of Planning Education and Research**, v. 39, n. 1, p. 93-112, 2019.
- XIE, Y; SHEKHAR, S; LI, Y. Statistically-robust clustering techniques for mapping spatial hotspots: A survey. **Computing Surveys (CSUR)**, v. 55, n. 2, p. 1-38, 2022.
- XU, F; BARBA, K. A comparison of prospective space-time scan statistics and spatiotemporal event sequence based clustering for COVID-19 surveillance. **PLoS One**, v. 16, n. 6, p. e0252990, 2021.

XU, J., LV, T., HOU, X., DENG, X., LI, N., & LIU, F. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of renewable energy production in China: A spatial econometric analysis. **Energy Economics**, v. 116, p. 106399, 1 dez. 2022.

XU, Y.; CHEN, P. Energy transition and regional heterogeneity of environmental taxation in China: From the perspective of emission reduction effects. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 944131, 2022.

YAN, L. I., ZHANG, Q., GE, W. A. N. G., & XI, L. U. Recycling schemes and supporting policies modeling for photovoltaic modules considering heterogeneous risks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106165, 2022.

YANG, Q., ZHANG, H., BAI, W., LIU, W., 2018. County-Scale migration attractivity and factors analysis. 26th International Conference on Geoinformatics IEEE 1–7.

YI, T., TONG, L., QIU, M., & LIU, J.. Analysis of Driving Factors of Photovoltaic Power Generation Efficiency: A Case Study in China. **Energies**, v. 12, n. 3, p. 355, jan. 2019.

YU, B., FANG, D., YU, H., & ZHAO, C. Temporal-spatial determinants of renewable energy penetration in electricity production: Evidence from EU countries. **Renewable Energy**, v. 180, p. 438–451, 1 dez. 2021.

ZACHO, K. O.; MOSGAARD, M. A. Understanding the role of waste prevention in local waste management: A literature review. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 10, p. 980–994, 1 out. 2016.

ZAHRAN, S., BRODY, S. D., VEDLITZ, A., LACY, M. G., & SCHELLY, C. L.. Greening Local Energy: Explaining the Geographic Distribution of Household Solar Energy Use in the United States. **Journal of the American Planning Association**, v. 74, n. 4, p. 419–434, 21 out. 2008.

ZARATE-PERZ, E; SEBASTIÁN, R. Autonomy evaluation model for a photovoltaic residential microgrid with a battery storage system. **Energy Reports**, v. 8, p. 653-664, 2022.

ZHANG, L; ZHANG, Q; RAFIQ, M.A. The economic and environmental analysis of solar energy development under climate impacts. **Science Progress**, v. 105, n. 3, p. 00368504221124065, 2022.

ZHANG, X., GENG, Y., TONG, Y. W., KUA, H. W., TIAN, X., WU, R., ... & CHIU, A. S. 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.

ZHENG, S.; YANG, J.; YU, S. How renewable energy technological innovation promotes renewable power generation: Evidence from China's provincial panel data. **Renewable Energy**, v. 177, p. 1394–1407, 1 nov. 2021.

ZHONG, Z., ZHANG, Y., SHEN, H., & LI, X. Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121394, 2020.

ZHUANG, X; PAN, L. Study on the Impact of Clean Power Investment on Regional High-Quality Economic Development in China. **Energies**, v. 15, n. 22, p. 8364, 2022.