

DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTVOLTAICA NO ESTADO DA PARAÍBA

CLARISSE FREIRE BARBOZA MAURÍCIO
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

LUIZ MOREIRA COELHO JUNIOR
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

ITALO ROGER FERREIRA MORENO PINHEIRO DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

MONICA CARVALHO

RAPHAEL ABRAHÃO

Introdução

A energia solar fotovoltaica possui geração rápida e intermitente, por isso é uma das fontes mais promissoras da atualidade. A fonte energética solar fotovoltaica está se estabelecendo no mercado por ser fator importante na diversificação na matriz energética mundial. Isto é fator fundamental para atingir os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que foram apresentados pela ONU como desafios críticos que precisam ser enfrentados. Dentro da estrutura dos ODS, o sétimo objetivo visa garantir energia acesso à energia confiável, sustentável e moderna para todos.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Para identificação do lugar de destaque do setor fotovoltaica e influência da vizinhança, realiza-se estudos sobre distribuição e dependência espaço-temporal para entender a dimensão da agregação espacial para a variável, podendo relevar correlações globais ou locais. Em busca de entender o mercado fotovoltaico paraibano e sua dinâmica regional, o presente artigo visa analisar a distribuição e dependência espaço-temporal da Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021. Além disso, contribuir para desenvolvimento de políticas estatais no setor renovável.

Fundamentação Teórica

Na análise exploratória de dados espaciais (AEDE) verifica-se instabilidades espaciais, avalia-se a autocorrelação espaciais e identifica-se a presença de clusters e outliers. 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 . 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.

Metodologia

Como objeto de estudo considerou-se a potência instalada, em quilowatt – kW, per capita das instalações de GD fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021, dos municípios e regiões imediatas. Para os dados serem proporcionais, considerou-se a variável per capita. A população das cidades da Paraíba foi fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística - IBGE referentes a 2010 e 2021. Para realizar a projeção da população dos demais anos foi usada a Taxa de Crescimento Geométrico (RGG). Utilizou-se o I de Moran Global e Local para realizar a análise exploratória de dados espaciais.

Análise dos Resultados

A evolução da tecnologia mostrou que os grupos de tensão mais comuns são os B1 e B3. O I de Moran Global para regiões imediatas e municípios da Paraíba teve comportamento semelhante, com início do índice negativo e, em seguida, a autocorrelação tornou-se positiva, pelo aumento de regiões com a potência instalada per capita no decorrer dos anos. Identificou-se pontos de alavancagem para os grupos B1 e B2 e a análise da matriz do tipo “rainha” mostrou que os grupos de tensão com potência instalada per capita baixa, tiveram autocorrelação negativa.

Conclusão

O uso do AEDE para o setor de Geração Distribuída no Brasil foi inédito e mostrou boa forma de adaptação. Este artigo consegue validar a aplicação da metodologia a este objeto de estudo. O entendimento do padrão espacial da GD fotovoltaica apresentada pode ajudar novas implantações de tecnologia, assim como o desenvolvimento de políticas públicas focadas em regiões aglomeradas. Além de investimentos privados em regiões dispersas, com o mercado ainda frio.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração Distribuída. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/pt_BR/dataset/relacao-de-empresamentos-de-geracao-distribuida. Acesso em: 19 abr. 2022. ANSELIN, Luc. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. ANSELIN, Luc. Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 83, n. 3, p. 705-710, 2001.

Palavras Chave

Clusters, I de Moran, Potência per capita

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem a concessão de bolsa de mestrado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e o apoio financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ pelo Edital nº 09/2021 Demanda Universal ao projeto “Avaliação sistêmica da energia solar fotovoltaica no estado da Paraíba”.

DISTRIBUIÇÃO E DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA PARAÍBA

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica possui geração rápida e intermitente, por isso é uma das fontes mais promissoras da atualidade. Com o desenvolvimento das atividades econômicas que priorizam pessoas e meio ambiente, a energia solar aparece em destaque e tem alta tendência à expansão na matriz energética mundial (DONGSHENG; WENJIA, 2021). A fonte energética solar fotovoltaica está se estabelecendo no mercado por ser fator importante na diversificação na matriz energética mundial. Isto é fator fundamental para atingir os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que foram apresentados pela ONU como desafios críticos que precisam ser enfrentados (BRUNET et al., 2022). Dentro da estrutura dos ODS, o sétimo objetivo visa garantir energia acesso à energia confiável, sustentável e moderna para todos (GEBARA, 2023).

De acordo com International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022), em 2021 a energia solar fotovoltaica representava 27,7% da capacidade instalada mundial com aproximadamente 885 GW. A China era o país com maior capacidade instalada, com mais de 300 GW, aproximadamente 36% da capacidade total instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo. No Brasil, energia solar fotovoltaica é geograficamente vantajosa, por ser zona tropical e os raios solares incidirem quase perpendicularmente, favorecendo os níveis de irradiação solar. Por este motivo, esta fonte renovável tem grandes perspectivas futuras no país (MARTINS et al., 2017).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2022) mostrou que no Brasil, em 2021, houve a instalação de 400.273 novas unidades geradoras de Geração Distribuída –GD fotovoltaica. Estas unidades somaram aproximadamente 4 GW de capacidade instalada e totalizou 803.761 unidades no território brasileiro com mais de 8 GW de capacidade instalada. Esta tecnologia gerou 9 TWh, sendo 4,23 para autoconsumo remoto e 4,78 para injeção na rede elétrica.

Em 2021, o Estado do Brasil com maior capacidade instalada era Minas Gerais com 1,5 GW e 130.840 sistemas instalados e Cuiabá era o município com maior capacidade instalada, 104 MW com 9.550 unidades geradoras. A Paraíba somou 11.783 unidades geradoras de GD Fotovoltaica com 152 MW, estima-se que o Estado gerou 179 GWh por GD fotovoltaica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2022).

Ao lidar com recursos ambientais, é importante considerar questões referentes à geografia econômica, pois as análises convencionais da economia falharam e as estatísticas espaciais mostram-se de modo atrativo (SIMMONS; SHANNON, 1986; ALMEIDA, 2012). Esta atratividade baseia-se em mostrar o elo entre o agente analisado e os agentes externos ao sistema. São consideradas conexões individuais e sua influência no comportamento coletivo e padrões existentes, provando que as regiões e cidades circunvizinhas influenciam-se mutuamente (ANSELIN, 1988; MADDISON, 2007).

A autocorrelação espacial é a medida de correlação de uma variável consigo mesma no espaço, considerando as similaridades locais (MATHUR, 2015). Esta análise é importante para entender a dimensão da agregação espacial para a variável, podendo relevar correlações globais ou locais (LI et al., 2022). A Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) lida com questões que não se revolvem por observação direta dos dados. É preciso considerar o comportamento do conjunto, levando em conta as características espaciais (FREITAS et al., 2022)

Nos últimos anos, observou-se aumento em agregar a análise espacial à modelagem econômica. Dunn et al. (2019) utilizaram esta metodologia para analisar 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) mostra as características espaciais da energia de baixo carbono na China com o auxílio do AEDE. 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, com uma abordagem econométrica espacial. Coelho Júnior (2018) analisou a distribuição e dependência espacial da produção de lenha no Nordeste brasileiro e Santos Júnior et al. (2022) realizaram esta análise para bioeletricidade florestal no Brasil.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi analisar a distribuição e dependência espaço-temporal da Geração Distribuída fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021. Esta análise da GD fotovoltaica deve explicar a evolução da tecnologia e as mudanças ocorridas na Paraíba decorrer dos anos. Os resultados podem incentivar investimentos públicos e privados no setor, além de apoiar novas políticas públicas energéticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 OBJETO DE ESTUDO

Como objeto de estudo considerou-se a potência instalada, em quilowatt – kW, per capita das instalações de GD fotovoltaica na Paraíba, de 2014 a 2021, dos municípios e regiões imediatas. As unidades geradores são 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 2,3 kV e é a junção dos grupos: B1, classe residencial; B2, classe rural; B3, demais classes como comercial, industrial, poder público ou serviço público; B4, iluminação pública.

Para os dados serem proporcionais, considerou-se a variável per capita. A população das cidades da Paraíba foi fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística - IBGE referentes a 2010 e 2021. Para realizar a projeção da população dos demais anos foi usada a Taxa de Crescimento Geométrico (RGG) mostrada na Equação 1. Esta taxa também foi utilizada para analisar aumento e queda na potência instalada na Paraíba, entre 2014 a 2021.

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

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.

2.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS

Na análise exploratória de dados espaciais (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 podem se ligar pela lista de vizinhos de cada polígono, pela conexão do comprimento da fronteira comum ou pela distância entre eles (O’SULLIVAN; UNWIN, 2010).

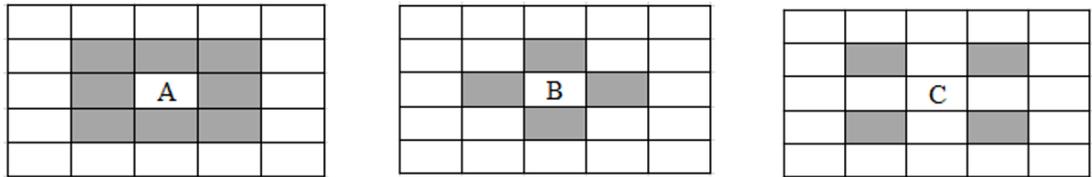
Não haverá nenhuma região sem vizinho, tornando vantajosa a utilização desse tipo de método por proporcionar o equilíbrio da conectividade da matriz. A proximidade é a base do critério de conexão geográfica da matriz de pesos espaciais, definindo-se de acordo com a contiguidade e/ou distância geográfica (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 pontos tendo latitudes ou longitudes iguais, assim possuindo maior interação espacial (FISCHER; WANG, 2011). Formalmente, define-se como:

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

Encontra-se 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 1 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 1: 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 baseia-se na distância geográfica das regiões (ALMEIDA, 2012), definido por:

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

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).

2.2.1. 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 (WANG, 2020; FU et al., 2014). Este índice também determina se a variável é agrupada, dispersa ou aleatória baseando-se nos valores e nos locais analisados (CLIFF; ORD, 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 2.

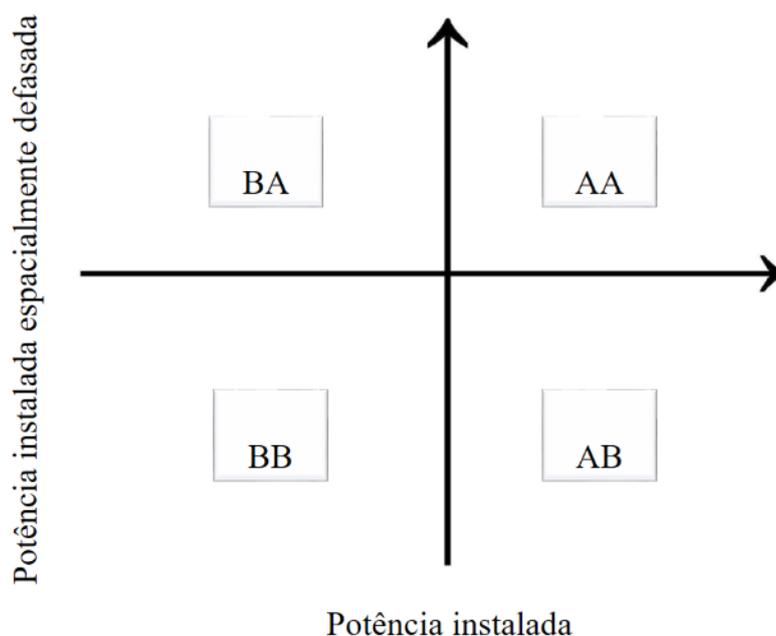
$$I_{Moran_Global} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

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 2.

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.

Figura 2: Diagrama de Dispersão de Moran.



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

2.2.2. I de Moran local

O Índice de Moran Local 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. (CAMARA et al., 2004).

O I de Moran Local estuda locais individuais, possibilitando a identificação de hotspots (pontos quentes) em que a tecnologia mostra-se aquecida. Compara a variável em regiões vizinhas e entrega informações ligadas à localização de 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 3.

$$I_{Moran_local} = (Y_j - \bar{Y}) \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

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).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra a evolução dos grupos de tensão da GD fotovoltaica, em MW, para os anos de 2014 a 2021. Os grupos A3 e AS não possuem taxa de crescimento por terem instalação apenas em 2021. O grupo B4 possui 0% de crescimento por possuir apenas a instalação de 50 kW, em Monteiro, em 2019, e não ter tido nenhum aumento desde então.

Os grupos B1 e B3, os primeiros grupos de tensão a se estabelecer no Estado da Paraíba, têm maior potência instalada. A taxa de crescimento geométrico destes grupos mais significativa é entre os anos de 2015 e 2016, 199% e 193% para os grupos B1 e B3, respectivamente. Este alto crescimento pode ligar-se à Resolução Normativa 687 de 2015 que criou o sistema de compensação de créditos entre filiais e suas matrizes. A Resolução também aumentou o limite da minigeração para 5 MW e a validade dos créditos de energia elétrica para 60 meses, criou a possibilidade de geração compartilhada que proporcionou maior facilidade para o usuário da GD fotovoltaica.

O grupo B3 teve maior taxa de crescimento entre os anos de 2016 e 2017, sendo 231%. Nos grupos mais comuns de baixa tensão, B1, B2 e B3, a taxa de crescimento tem valor superior a 100% nos anos de 2015 a 2018 que também pode ser reflexo da Resolução de 2015 da ANEEL.

O grupo de alta tensão A1 teve sua primeira instalação em 2020 e teve grande aumento para 2021, de 137%, que mostra tendência de crescimento deste tipo de instalação. O A4 é o

grupo de alta tensão com maior potência instalada na Paraíba, sua primeira instalação foi em 2016 e nos anos posteriores tem taxa de crescimento positiva em todas as análises realizadas. A potência instalada total no Estado da Paraíba tem crescimento positivo em todas as análises realizadas, desde 2014 até 2021 que mostra que a tecnologia tem grande potencial no Estado.

Tabela 1: Potência Instalada da geração distribuída fotovoltaica na Paraíba dos grupos de tensão (MW) das unidades geradoras, de 2014 a 2021.

Grupo /ano	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

Fonte: ANEEL (2022).

O maior crescimento da potência instalada é entre os anos de 2015 e 2016 que pode ser reflexo dos benefícios da Resolução Normativa 687 da ANEEL. Entre 2020 e 2021 foi a menor taxa de crescimento geométrico que pode-se justificar pelo cenário mundial de pandemia da COVID-19, sendo uma situação atípica que afetou todos os mercados.

Na Tabela 2 são mostrados os índices referentes à reta do diagrama de dispersão de Moran das regiões imediatas da Paraíba. Foi utilizada a matriz de vizinhos mais próximos com pesos espaciais de 2, 4 e 6 vizinhos e matriz de contiguidade com convenção de “rainha” e “torre” nos anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021. Alguns índices tiveram valores negativos em seus primeiros anos de instalação, mostrando dissimilaridade entre as áreas tal qual Freitas et al. (2022). Isto pode ser reflexo da tecnologia ainda estar ganhando estabelecendo-se na Paraíba. No decorrer dos anos, os índices foram crescendo por tornarem-se mais disseminados.

Os grupos de alta tensão, até o ano de 2018 são mostrados valores negativos e Fotheringham et al. (2002) mostram isto como dissimilaridade entre a localização da variável e o valor da variável. Os menores valores são referentes à matriz “rainha” e “torre”. Nos vizinhos mais próximos, o valor do índice diminui à medida que o número de vizinhos se eleva pelo aumento da distância.

O índice para os grupos de alta tensão foi positivo na década de 2020. Esta autocorrelação espacial positiva é mostrada por Fotheringham et al. (2002) como similaridade, ou seja, os valores altos tendem a agrupar-se juntos, circundados de valores altos nas regiões vizinhas, o mesmo acontece para os valores baixos. A análise dos índices para os grupos de baixa tensão, assim como as instalações totais, é semelhante, pois os grupos de alta tensão tem baixa potência instalada per capita. Além de ter baixa distribuição, estão instalados em apenas 13 das 15 regiões imediatas da Paraíba.

Em 2014, apenas duas regiões imediatas da Paraíba possuíam instalação, em decorrência disso, o valor do I de Moran mostrou autocorrelação negativa. Nos anos posteriores, os valores foram elevando-se por aumentar a similaridade, ou seja, valores baixos/altos perto de vizinhança de baixos/altos.

Tabela 2: I de Moran global da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da GD fotovoltaica para regiões imediatas da Paraíba para matriz de vizinhos mais próximos (2, 4 e 6) e matriz de contiguidade com convenção de "rainha" e torre", nos anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021.

	Tipo de matriz	2014	2016	2018	2020	2021
Alta tensão	2 vizinhos		-0,071	-0,067	0,425	0,323
	4 vizinhos		-0,054	-0,077	0,412	0,351
	6 vizinhos		-0,048	0,046	0,261	0,290
	Rainha		-0,101	-0,151	0,435	0,395
	Torre		-0,101	-0,151	0,435	0,395
Baixa tensão	2 vizinhos	-0,116	0,521	0,681	0,803	0,714
	4 vizinhos	-0,131	0,469	0,386	0,661	0,616
	6 vizinhos	-0,151	0,293	0,234	0,496	0,456
	Rainha	-0,197	0,397	0,412	0,720	0,665
	Torre	-0,197	0,397	0,412	0,720	0,665
Total	2 vizinhos	-0,116	0,405	0,641	0,765	0,682
	4 vizinhos	-0,131	0,375	0,372	0,599	0,594
	6 vizinhos	-0,151	0,218	0,248	0,428	0,447
	Rainha	-0,197	0,284	0,372	0,675	0,652
	Torre	-0,197	0,284	0,372	0,675	0,652

Fonte: Autores.

Os índices para a matriz “torre” e “rainha” têm valores iguais pela posição geográfica similar dos vizinhos das regiões imediatas, por serem apenas 15 regiões, as matrizes se aproximam na hora de selecionar as regiões vizinhas. Na matriz com 2, 4 ou 6 vizinhos mais próximos, quando a quantidade de vizinhos se eleva, a autocorrelação diminui por aumentar a influência da vizinhança.

O maior valor esteve presente em 2020 na análise de baixa tensão com 2 vizinhos, 0,803, que aproxima-se da unidade, mostrando que praticamente todas as regiões estudadas estão rodeadas de regiões vizinhas semelhantes (Alto-Alto ou Baixo-Baixo). O menor valor está na análise de baixa tensão e total, em 2014, para “rainha” e “torre”, com -0,197, por existir apenas nas regiões imediatas de João Pessoa e Patos, apresentando dissimilaridade.

Na Tabela 3, 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” e “torre” e matriz de vizinhos próximos para 2, 4 e 6 vizinhos para os anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021.

A análise iniciou-se com valores negativos, mostrando a dispersão dos dados, de acordo com Almeida (2012). Diferentemente da análise das regiões imediatas, nos municípios, existem de 223 cidades na Paraíba e apenas 42 delas tem instalação de GD fotovoltaica de alta tensão. Assim, a autocorrelação é negativa na maioria dos anos, apenas em 2021 que é positivo, com exceção da análise pela matriz de “torre” que possui valor de -0,006.

Os grupos de baixa tensão e total têm análises semelhantes, pois os grupos de baixa tensão serem a maioria da análise. São apresentados valores positivos a partir de 2018, em decorrência das instalações terem aumentado e serem influenciados entre si. Almeida (2012) mostra que este sinal positivo da autocorrelação mostra que a potência instalada per capita está concentrada nos municípios.

Tabela 3: I de Moran Global da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da geração distribuída fotovoltaica para municípios da Paraíba para matriz de vizinhos mais próximos (2, 4 e 6) e matriz de contiguidade com convenção de "rainha" e torre", nos anos de 2014, 2016, 2018, 2020 e 2021.

	Tipo de matriz	2014	2016	2018	2020	2021
Alta tensão	2 vizinhos		-0,005	-0,010	-0,028	0,031
	4 vizinhos		-0,005	-0,008	-0,010	0,014
	6 vizinhos		-0,006	-0,012	0,003	0,003
	Rainha		-0,006	-0,017	-0,007	0,016
	Torre		-0,006	-0,016	-0,006	-0,006
Baixa tensão	2 vizinhos	-0,004	-0,025	0,228	0,168	0,217
	4 vizinhos	-0,005	-0,023	0,241	0,230	0,260
	6 vizinhos	-0,006	-0,020	0,302	0,268	0,301
	Rainha	-0,009	0,062	0,330	0,313	0,322
	Torre	-0,009	0,052	0,360	0,337	-0,004
Total	2 vizinhos	-0,004	-0,022	0,220	0,135	0,124
	4 vizinhos	-0,005	-0,023	0,234	0,205	0,193
	6 vizinhos	-0,006	-0,020	0,293	0,229	0,228
	Rainha	-0,009	0,069	0,319	0,275	0,271
	Torre	-0,009	0,058	0,347	0,299	0,293

Fonte: Autores.

O menor índice de autocorrelação está presente nas matrizes de 2 vizinhos mais próximos das análises de baixa tensão com valor de -0,025 no ano de 2015, que mostra a maior dispersão dos dados. Já o valor que mais se aproxima da unidade, com homogeneidade é a matriz de torre no ano de 2018 para baixa tensão.

Na Tabela 4, são mostrados os valores da inclinação das retas do diagrama de dispersão do I de Moran Global com matriz de contiguidade “rainha” para os grupos de tensão, alta tensão, baixa tensão e a soma dos grupos da GD fotovoltaica para os anos de 2014, 2018 e 2021.

Em 2014, apenas os grupos de tensão B1 e B2 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. Pode-se ver pontos de alavancagem que, para retas com inclinação negativa, são pontos afastados do padrão espacial localizado no quadrante Alto-Baixo ou Baixo-Alto e são observados no quadrante Alto-Baixo.

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.

O grupo B1 também tem alto valor por estar presente em todas as regiões imediatas da Paraíba e indica que os valores de potência per capita estão com valores altos próximos a valores altos e/ou valores baixos próximos a valores baixos. Estes valores positivos indicam que as instalações do tipo B1 têm autocorrelação espacial significativa e o agrupamento espacial das regiões imediatas tem grau semelhante, tal qual foi observado por Lv, Liu e Xu (2022).

Tabela 4: I de Moran global da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da geração distribuída fotovoltaica para as regiões imediatas da Paraíba para matriz de contiguidade com convenção de "rainha", nos anos de 2014, 2018 e 2021.

Grupo de tensão	2014	2018	2021
A1			-0,107
A3			-0,127
A4		-0,151	0,391
AS			-0,127
Alta tensão		-0,151	0,395
B1	-0,182	0,366	0,659
B2		0,21	0,459
B3	-0,101	0,294	0,584
B4			-0,024
Baixa tensão	-0,197	0,412	0,665
Total	-0,197	0,372	0,652

Fonte: Autores.

Já os grupos que estão 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 possuem instalação.

Na Tabela 5 são mostrados os valores da inclinação das retas do diagrama de dispersão do I de Moran Global com matriz de contiguidade “rainha” para 2014, 2018 e 2021, nos municípios. São analisados os grupos de baixa tensão, de alta tensão, toda potência instalada e os grupos separadamente.

Tabela 5: I de Moran global da potência instalada per capita (quilowatts – kW) da geração distribuída fotovoltaica para os municípios da Paraíba para matriz de contiguidade com convenção de "rainha", nos anos de 2014, 2018 e 2021.

Grupo de tensão	2014	2018	2021
A1			-0,022
A3			-0,007
A4		-0,017	0,009
AS			-0,007
Alta tensão		-0,017	0,012
B1	-0,006	0,344	0,339
B2		0,030	0,208
B3	-0,006	0,221	0,171
B4			-0,006
Baixa tensão	-0,009	0,330	0,301
Total	-0,009	0,319	0,271

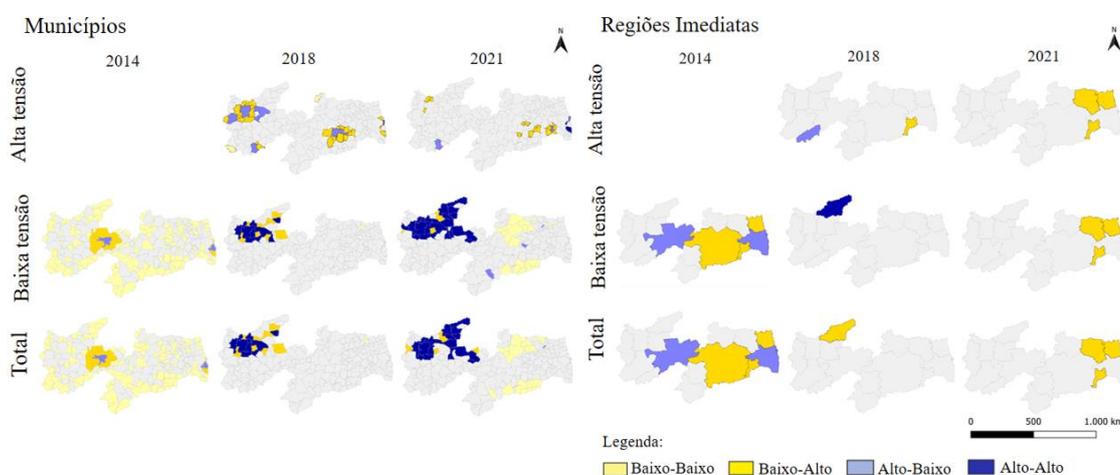
Fonte: Autores.

A análise municipal é análoga à análise de região imediata em que os valores negativos se apresentam 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 possibilidade de vizinhos. O maior valor está presente no ano de 2021 é para o grupo B1, 0,339, pela presença do grupo em 211 cidades da Paraíba. O segundo maior valor está presente na análise da baixa tensão, por sua presença em 217 cidades da Paraíba.

O valor inferior da análise municipal, quando comparada à das regiões imediatas, dá-se 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, tem maior possibilidade de ter vizinhos com potência per capita similar.

Na Figura 3 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.

Figura 3: 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: Autores.

A maioria das cidades apresentaram-se com agrupamento espacial estatisticamente insignificante durante o período de estudo, tal qual Chen et al. (2018). No entanto, em 2018 para os grupos de alta tensão nota-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, observa-se um cluster Alto-Baixo e Baixo Alto formados pelas cidades que compõem as regiões imediatas de Cajazeiras, Sousa e Pombal. Em 2021, para os grupos de alta tensão, é possível observar uma polarização no mapa.

Em 2014, para os grupos de baixa tensão, formou-se uma aglomeração espacial do tipo Baixo-Alta que é formada pelas regiões de Campina Grande e Sumé. Na visão municipal, nota-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. Em 2018, para os municípios, pode-se observar 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.

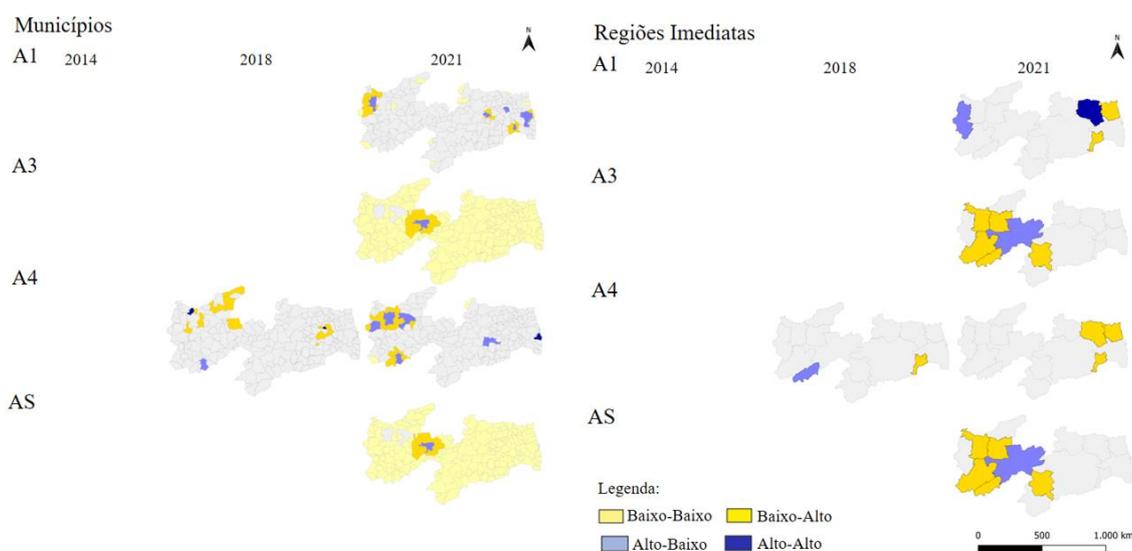
A análise total dos grupos é similar aos grupos de baixa tensão em razão da potência instalada per capita para alta tensão ser muito inferior, quando comparada aos grupos de baixa tensão.

Na Figura 4 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. No grupo A1 é possível identificar um cluster Alto-Baixo na região imediata de Cajazeiras. Nos municípios, pode-se identificar

que São João do Rio do Peixe com característica Alto-Baixo e as cidades vizinhas, Uiraúna, Poço de José de Moura, Triunfo e Santa Helena, formam um cluster Baixo-Alto.

O grupo A3 nas regiões imediatas, é identificado um cluster Baixo-Alto formado pelas regiões imediatas de Pombal, Sousa, Itaporanga e Princesa Isabel. O A4, em 2018, contém um aglomerado espacial do tipo Baixo-Alto composto pelas regiões Patos e Itaporanga. Em 2021, o cluster identificado é Alto-Alto, formado pelas regiões de Catolé do Rocha-São Bento, Pombal, Sousa e Cajazeiras.

Figura 4: 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: Autores.

Na análise municipal, em 2018, tem-se clusters detectados formados por Princesa Isabel que tem características Alto-Baixo e as cidades vizinhas, Teixeira, Nova Olinda, Manaíra, Curral Velho e São José de Princesa caracterizados como Baixo-Alto.

Outro cluster é identificado por municípios que estão nas regiões imediatas de Sousa e Cajazeiras. Na análise do grupo de tensão AS, assim como A3, mostrou-se que apesar de haver apenas uma instalação na Paraíba, o software interpretou que todos os vizinhos são influenciados por este município.

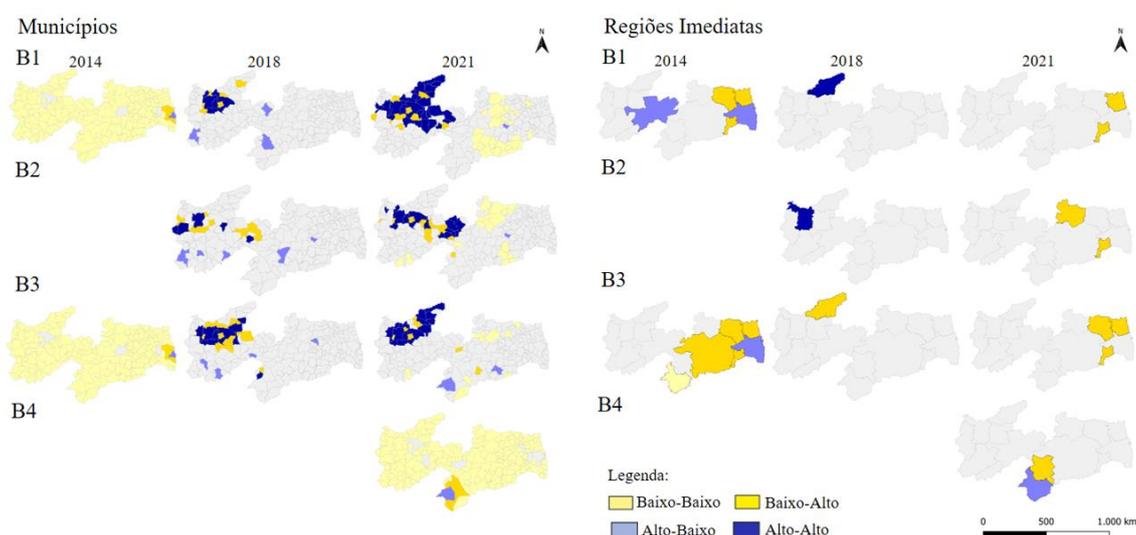
A Figura 5 mostra a estatística para regiões imediatas e municípios da Paraíba com matriz “rainha” para os anos de 2014, 2018 e 2021 e grupos de baixa tensão. Na análise municipal do grupo B1, em 2014, apenas João Pessoa mostra relevância, embora sua influência seja na maioria dos municípios do estado. O mesmo ocorre 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 instalações em anos posteriores.

Em 2018, Cajazeirinhas centra um cluster em que a cidade tem características Baixo-Alto e as cidades vizinhas tem características Alto-Alto. Para as regiões imediatas nota-se aglomerações espaciais do tipo Baixo-Baixo formado pelas regiões de Campina Grande, Guarabira e João Pessoa e do tipo Alto-Alto nas regiões de Catolé do Rocha-São Bento, Sousa e Pombal. Para 2021, a análise regional é similar a 2018 e a municipal mostra um aumento no cluster que já existiam do tipo Alto-Alto expandindo para os municípios que formam as regiões de Catolé do Rocha-São Bento, Pombal e Patos. Há o aparecimento de dois clusters do tipo Baixo-Baixo nas cidades que fazem parte das regiões de Nova Floresta e Campina Grande.

Na análise municipal do grupo B3 nota-se 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, nota-se 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.

Em 2021, tem-se dois clusters distintos, o primeiro é do tipo Baixo-Baixo com Campina Grande, Guarabira e João Pessoa e o segundo é formado por Catolé do Rocha-São Bento sendo Baixo-Alto e Pombal e Sousa sendo Alto-Alto. O grupo B2 apresenta cluster Alto-Alto com municípios, em 2021, que compõem cidades das regiões de Pombal e Patos e na análise regional tem-se cluster do tipo Alto-Alto com as regiões imediatas de Catolé do Rocha-São Bento, Sousa e Pombal.

Figura 5: 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: Autores.

4 CONCLUSÃO

Este estudo analisou a distribuição e dependência espacial da GD fotovoltaica per capita na Paraíba de 2014 a 2021, destacando a evolução da tecnologia. Os grupos de tensão que possuem maior taxa de crescimento são os grupos B1 e B3, também são os grupos com maior potência instalada e pioneiros no Estado. Os grupos de tensão de baixa tensão mais comuns, B1, B2 e B3, tem taxa de crescimento positiva em todos os anos.

No índice de dispersão de Moran para regiões imediatas e municípios da Paraíba houve comportamento semelhante na análise das matrizes, 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. Na medida que os vizinhos aumentam, o índice diminuiu.

Na análise dos grupos de tensão pela matriz de contiguidade do tipo “rainha” notou-se que os grupos que têm quantidade reduzida de instalações tiveram valor de autocorrelação negativo, enquanto os que possuem maior quantidade de sistemas instalados, iniciaram com valor negativo e transformaram-se em autocorrelação positiva.

Quanto à estatística LISA, para os grupos de tensão que tem poucas instalações, nos primeiros anos, mostrou-se que todos os municípios sofrem influência desta instalação. Para os grupos de tensão que tem maior disseminação, os clusters estão distribuídos no estado com maior concentração nas regiões imediatas de Patos, Sousa, Cajazeiras e Pombal.

O uso do AEDE para o setor de Geração Distribuída no Brasil foi inédito e mostrou boa forma de adaptação. Este artigo consegue validar a aplicação da metodologia a este objeto de estudo. O entendimento do padrão espacial da GD fotovoltaica apresentada pode ajudar novas implantações de tecnologia, assim como o desenvolvimento de políticas públicas focadas em regiões aglomeradas. Além de investimentos privados em regiões dispersas, com o mercado ainda frio.

5 REFERÊNCIAS

- 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.
- ALMEIDA, Eduardo. Econometria espacial. Campinas-SP. Alínea, 2012.
- ANSELIN, Luc. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.
- ANSELIN, Luc. *Spatial econometrics: methods and models*. Springer Science & Business Media, 1988.
- ANSELIN, Luc. Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 83, n. 3, p. 705-710, 2001.
- ANSELIN, Luc; BERA, Anil K. Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics. *Statistics textbooks and monographs*, v. 155, p. 237-290, 1998.
- ANSELIN, Luc; CHO, Wendy K. Tam. Spatial effects and ecological inference. *Political analysis*, v. 10, n. 3, p. 276-297, 2002.
- BRUNET, Carole et al. 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.
- CÂMARA, Gilberto et al. Análise espacial e geoprocessamento. Análise espacial de dados geográficos. Brasília: EMBRAPA, p. 21-54, 2004.
- CHEN, Jiandong et al. 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, Yu; MIAO, Qianqian; ZHOU, Qian. 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, Andrew David et al. *Spatial diffusion: an historical geography of epidemics in an island community*. CUP Archive, 1981.
- COELHO JUNIOR, Luiz Moreira; MARTINS, Kalyne de Lourdes da Costa; SILVA, Magno Vamberto Batista da. Spatial convergence of the gross value of production of firewood in the mesoregions of the Brazilian Northeast. *Revista Árvore*, v. 42, 2018.
- DOU, Yi et al. 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, Laurel N. et al. Exploratory analysis of high-resolution power interruption data reveals spatial and temporal heterogeneity in electric grid reliability. *Energy Policy*, v. 129, p. 206-214, 2019.

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.

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

FU, Weijung J. et al. 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.

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.

JUNIOR, Luiz Moreira Coelho et al. Concentration and clusters of black liquor thermoelectric plants in Brazil. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, n. 12, p. 2122-2129, 2021.

KUMARI, Maya; SARMA, Kiranmay; SHARMA, Richa. 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, Julie; ERTUR, Cem. 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, Dongsheng; CAI, Wenjia. Optimal configuration of photovoltaic energy storage capacity for large power users. *Energy Reports*, v. 7, p. 468-478, 2021.

LI, Linming et al. Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park. *Ecological Indicators*, v. 137, p. 108727, 2022.

LV, Zhike; LIU, Wangxin; XU, Ting. 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, Angus. *The world economy*. Academic Foundation, 2007.

MARTINS, Fernando Ramos et al. *Atlas brasileiro de energia solar 2*. 2017.

MATHUR, Manish. Spatial autocorrelation analysis in plant population: An overview. *Journal of Applied and Natural Science*, v. 7, n. 1, p. 501-513, 2015.

O'SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. (2010) *Geographic information analysis*. New Jersey: John Wiley and Sons. 405 p.

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

SILVA, N. C. N. et al. Análise de dados de área aplicada a dois indicadores econômicos de mesorregiões do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Biometria*, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 369-395, 2011.

SIMMONS, Shannon N. *Economic, political, and social effects of man-induced environmental disasters*. 1986.

- SYMANZIK, Jürgen. Exploratory spatial data analysis. In: Handbook of regional science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 1295-1310.
- TSAI, Pui-Jen et al. 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, Kaifeng et al. 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.
- Yang, Q., Zhang, H., Bai, W., Liu, W., 2018. County-Scale migration attractivity and factors analysis. 26th International Conference on Geoinformatics IEEE 1–7.
- ZHANG, Xi et al. Spatial characteristics and its driving factors of low-carbon energy technology innovation in China: A gravity movement and exploratory spatial data analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 295, p. 126481, 2021.