

Energia Limpa? O Impacto dos Parques Eólicos na Vegetação Natural no Nordeste do Brasil

Maria Larissa Bezerra Batista¹

Raul da Mota Silveira Neto²

Resumo

O crescimento da demanda por energia, a preocupação com suas fontes não sustentáveis e o avanço das mudanças climáticas e aquecimento global acarretaram na procura de alternativas sustentáveis de produção energética. A energia eólica ganhou visibilidade nesse cenário, uma vez que é capaz de garantir o suprimento necessário e mitigar os efeitos causados ao meio ambiente pelos combustíveis fósseis. No entanto, a implantação de parques eólicos pode ocasionar desequilíbrios ambientais adversos ao desmatar áreas de vegetação natural. Dessa forma, o objetivo central deste estudo é analisar os impactos da construção de parques eólicos sobre as áreas de vegetação natural dos municípios da região Nordeste do Brasil com base na metodologia de Diferença em Diferenças (DID) escalonada desenvolvida por Callaway e Sant'Anna (2021) e dados de 1996 a 2022 do MapBiomass Brasil. Essa região possui a maior quantidade de empreendimentos eólicos brasileiros devido a melhor regularidade e velocidade do vento. Com base nisso, os resultados encontrados apontaram um efeito negativo, de aproximadamente 6% em todas as especificações principais (tratados e vizinhos imediatos como controle), da instalação dessas usinas na vegetação natural.

Palavras-Chave: Parques Eólicos; Vegetação Natural; Região Nordeste.

Abstract

The growth in energy demand, concerns about its unsustainable sources, and the advancement of climate change and global warming have led to the search for sustainable energy production alternatives. Wind energy has gained prominence in this scenario, as it can guarantee the necessary supply and mitigate the environmental impacts of fossil fuels. However, the implementation of wind farms can cause adverse environmental imbalances by deforesting areas of natural vegetation. Therefore, the main objective of this study is to analyze the impacts of wind farm construction on areas of natural vegetation in municipalities in the Northeast region of Brazil, based on the scaled Difference-in-Differences (DID) methodology developed by Callaway and Sant'Anna (2021) and data from 1996 to 2022 from MapBiomass Brasil. This region has the largest number of wind projects in Brazil due to its greater regularity and wind speed. Based on this, the results found indicated a negative effect of approximately 6% in all main specifications (treated and immediate neighbors as control) of the installation of these plants in natural vegetation.

Keywords: Wind Farms; Natural Vegetation; Northeast Region.

Classificação JEL: C21; C23; Q29; Q42.

Área 8 - Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

¹ Doutoranda em Economia pelo Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Pernambuco (PIMES/UFPE). E-mail: <maria.larissa25@gmail.com>.

² Professor da UFPE e PIMES. E-mail: <raul.silveirant@ufpe.br>.

1. Introdução

O aumento das necessidades de consumo atrelado ao crescimento populacional gerou uma preocupação crescente com a geração de energia, que é obtida, principalmente, por fontes não renováveis. Essas fontes provocam sérios danos ao meio ambiente, pois emitem grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa, e motivaram um importante debate internacional sobre as relações entre a geração de energia fóssil e sua contribuição para acelerar o processo das mudanças climáticas e o aquecimento global (Faria; Justino, 2011; Barcella; Brambilla, 2012). A questão energética é considerada um dos assuntos mais discutidos atualmente em decorrência da importância observada para a manutenção da qualidade de vida da sociedade atual e futura. O aumento da demanda global por energia causa uma preocupação com alguns problemas de planejamento, como a segurança no suprimento essencial para o desenvolvimento socioeconômico e os custos ambientais para atender essa maior procura (Goldemberg; Villanueva, 2003; Faria; Justino, 2011; Ministério de Minas e Energia, 2022).

As transformações verificadas no clima e suas consequências sobre diferentes setores resultaram em propostas de mitigação elaboradas em conferências mundiais promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU). Dentre as inúmeras possibilidades, está o investimento em energias renováveis com baixa emissão de gases de efeito estufa e atenuantes dos impactos ambientais. As fontes eólicas têm se destacado por apresentarem vantagens para a produção sustentável e a segurança do fornecimento (Global Wind Energy Council, 2008; European Wind Energy Association, 2010; Castro *et al.*, 2010; Nascimento; Mendonça; Cunha, 2012). Além disso, as usinas geradoras de eletricidade por meio da força dos ventos podem proporcionar a segurança energética dos países, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e controlar a poluição atmosférica ao diminuir as emissões de dióxido de carbono (Junfeng; Pengfei; Hu, 2010).

Apesar dos benefícios evidenciados, a construção dos parques eólicos também ocasiona diversos desequilíbrios ambientais locais, como a erosão do solo, desmatamento, perda de vegetação nativa e desaparecimento de *habitats* naturais (Leung; Yang, 2012; Spellman, 2014). A fase de preparação e edificação das usinas exigem a utilização de maquinário de grande porte, transporte de turbinas e distribuição de linhas de transmissão para instalação da energia à rede elétrica. Essas atividades podem acarretar na destruição de vegetação, perturbação ambiental, degradação do solo e alterações em elementos hidrológicos (Spellman, 2014; Dai *et al.*, 2015; Dhar *et al.*, 2020). A etapa de escavação de fundações, criação de estradas e manipulação de terrenos afetam os sistemas biológicos. Ademais, a remoção da vegetação provoca mudanças climáticas que impactam na regularidade dos padrões de chuvas e intensificam as consequências negativas sobre os ecossistemas (Nazir *et al.*, 2019; Nazir *et al.*, 2020).

No Brasil, os primeiros projetos de implantação de torres eólicas começaram a ser desenvolvidos na década de 1990. Esse acontecimento ocorreu em um período onde o país dependia fortemente de usinas hidrelétricas para o abastecimento elétrico (Sampaio; Batista, 2021). Entretanto, a exploração do potencial de eletricidade gerada através da força das águas encontrava-se no limite máximo, não existindo capacidade para novas expansões em larga escala (Jong; Kiperstok; Torres, 2015). Diante dessa situação e considerando o elevado potencial eólico brasileiro, verificou-se uma construção expressiva de parques dessa natureza, principalmente a partir de 2014 (Bezerra, 2019). A maior parte está localizada no Nordeste, pois essa região possui as melhores condições para o aproveitamento dessa fonte (Jong *et al.*, 2013; Jong *et al.*, 2017), uma vez que a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2025) afirma que o Nordeste possui, atualmente, mais de 90% dos parques instalados no Brasil.

Os trabalhos que discutem os impactos da implantação de empreendimentos eólicos no território brasileiro se concentram na avaliação dos seus efeitos no âmbito econômico, criação de empregos e arrecadação fiscal, como são o caso das pesquisas de Rintzel, Alves e Massuquetti (2017), Gonçalves, Rodrigues e Chagas (2020) e Irffi *et al.* (2025). Ambos

obtiveram resultados que indicam uma relação positiva entre a construção de usinas de aproveitamento do vento e o aumento de empregos, salários, Produto Interno Bruto (PIB) e recolhimento tributário. Mais raros são os estudos que consideram os impactos dos parques eólicos sobre o meio ambiente. Costa *et al.* (2019), em uma investigação descritiva e exploratória para o estado do Ceará, evidenciaram que as principais consequências sociais e ambientais observadas foram o desgaste das vias de acesso, descaracterização da paisagem natural e redução da fauna e flora. No entanto, essa e outras pesquisas (Cunha *et al.*, 2022; Oliveira; Sellitto; Flores, 2022) que abordam os aspectos ambientais no contexto brasileiro se dedicam às análises majoritariamente qualitativas de parques eólicos selecionados e baseados em estudos de caso.

O presente trabalho pretende preencher tal lacuna. O objetivo central é analisar os impactos da construção dos parques eólicos sobre as áreas de vegetação natural (floresta e formação natural não florestal) dos municípios da região Nordeste do Brasil que receberam tais empreendimentos. Esta análise é feita a partir da estimação de parâmetros de um modelo econométrico de Diferença em Diferenças (DID) com períodos de intervenção escalonados no tempo, utilizando o estimador proposto por Callaway e Sant’Anna (2021), consistente em relação a diferentes tipos de heterogeneidades.

Note-se que a aplicação da abordagem assinalada foi definida em virtude do próprio foco da pesquisa, tendo em vista que as instalações eólicas ocorreram em anos diferentes nos municípios selecionados para receber essa tecnologia. Esses municípios foram considerados como tratados a partir do início da vigência de outorga da primeira usina construída na cidade. O período analisado corresponde aos anos de 1996 a 2022, dada a disponibilidade dos dados e uma vez que o parque mais antigo instalado no Nordeste e que continua em funcionamento iniciou sua construção em 1998, na cidade de São Gonçalo do Amarante, Ceará.

Por fim, este artigo está estruturado em cinco seções. A primeira refere-se à introdução, que fornece um panorama inicial sobre o tema proposto. A segunda descreve alguns estudos nacionais e internacionais presentes na literatura e relevantes para a temática estudada. A terceira diz respeito a metodologia, com subseções de dados e descrição do método adotado. A quarta expõe os resultados obtidos do modelo principal e verificações de robustez. A quinta, por sua vez, apresenta as considerações finais do trabalho.

2. Revisão de literatura

Em meio ao avanço na instalação de complexos de energia eólica no mundo, desenvolvidos como uma alternativa para a promoção da segurança energética e pelos benefícios de se constituírem como uma fonte renovável, constata-se o crescimento no número de artigos publicados em periódicos de diversas áreas. Essas pesquisas discutem os diferentes impactos desses empreendimentos sobre variáveis econômicas e ambientais. Esta seção aborda alguns trabalhos existentes na literatura nacional e internacional, dividindo-os, respectivamente, segundo evidências empíricas para países desenvolvidos (Xia; Zhou, 2017; Qin *et al.*, 2022) e em desenvolvimento (Tang *et al.*, 2017; Aksoy *et al.*, 2023), englobando o Brasil (Rintzel; Alves; Massuquetti, 2017; Costa *et al.*, 2019; Gonçalves; Rodrigues; Chagas, 2020; Cunha *et al.*, 2022; Irffi *et al.*, 2025).

Um dos estudos relevantes sobre o tema foi elaborado por Xia e Zhou (2017), que avaliaram os possíveis impactos dos parques eólicos no crescimento da vegetação em duas regiões dos Estados Unidos nos anos de 2003 a 2014, o oeste do Texas e o norte de Illinois. Utilizando abordagens de análise de acoplamento espacial, ciclo sazonal, séries temporais e índices de vegetação, os autores constataram que esses empreendimentos causam efeitos insignificantes na vegetação local. Além disso, a maioria das alterações nos indicadores estão dentro da incerteza dos dados do Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS). Isso sugere que, no caso estudado pelos pesquisadores, as consequências, se

houverem, não podem ser separadas com total segurança da imprecisão e ruído dos dados. No geral, observou-se algumas pequenas diminuições no verde da cobertura vegetal nas regiões analisadas.

Por outro lado, Qin *et al.* (2022) obtiveram resultados divergentes ao também utilizarem dados de satélite do instrumento MODIS para quantificar as consequências no clima local e vegetação de 319 parques eólicos nos Estados Unidos no período de 2004 a 2018. As evidências encontradas indicaram a presença de impactos insignificantes na temperatura da superfície terrestre durante o dia, mas um aquecimento considerável à noite. Quanto ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), confirmou-se uma redução em 59% desses complexos na fase de construção de sua infraestrutura. Os impactos foram notados até 10 km de distância dos locais de instalação e dependiam do tamanho dos espaços ocupados.

Para um país em desenvolvimento, Tang *et al.* (2017) analisaram os efeitos dos parques eólicos na extensão e produtividade da vegetação no verão em Bashang, norte da China. Com base no índice de vegetação do MODIS e os dados de sensoriamento remoto de 2003 a 2014, os resultados mostraram que os parques ocasionaram um efeito inibidor expressivo no crescimento da vegetação. Essa afirmação é baseada nos cálculos do Índice de Área Foliar (IAF), Índice de Vegetação Melhorado (IVM) e IVDN. Ambos apresentaram reduções de aproximadamente 14,5%, 14,8% e 8,9%, nessa ordem. Os pesquisadores também atestaram um encolhimento de 8,9% na Produção Primária Bruta (PPB) e 4,0% na Produção Primária Líquida (PPL) anual.

Com objetivo semelhante, mas fazendo uso de tecnologias e recorte espacial distintos, Aksoy *et al.* (2023) apresentaram um modelo de diagnóstico apoiado em detecção remota e no Sistema de Informações Geográficas (SIG) para estabelecer as mudanças na vegetação depois da criação, entre 2002 e 2017, de 239 usinas eólicas nas penínsulas de Urla, Cesme e Karaburun, Turquia. A partir dessas técnicas, averiguou-se alterações na vegetação em sete classes de cobertura do solo dentro das zonas de instalação e controle. As maiores parcelas de modificações negativas foram identificadas no grupo de declive de 3-5%, incluindo florestas de folhas largas, florestas de coníferas e terras ocupadas pela agricultura. Ao passo que pastagens, vegetação esclerófila e arbustos demonstraram uma maior degradação em espaços com declive de 1-2%.

Para o contexto brasileiro, Rintzel, Alves e Massuquetti (2017) analisaram os efeitos econômicos decorrentes da instalação de unidades geradoras de energia através da força dos ventos, mais especificamente suas consequências sobre o emprego, arrecadação fiscal e Valor Adicionado Bruto (VAB) da agropecuária, indústria, serviços e administração. A metodologia utilizada refere-se ao Método Estrutural Diferencial e a área de estudo corresponde aos municípios da Região Sul do Brasil detentores de tais empreendimentos no período de 1998 a 2012. Suas estimativas apontaram para a existência de um impacto positivo dos parques nos fatores econômicos municipais. Essa conclusão foi corroborada apoiando-se na verificação de que a partir do momento em que os municípios passaram a contar com esses espaços, houve um incremento nas três variáveis observadas.

Em contrapartida, Costa *et al.* (2019) avaliaram as consequências ambientais, sociais, econômicas e tecnológicas da implantação e operação das usinas eólicas no litoral do estado do Ceará, Brasil. Essa avaliação foi empreendida pela análise comparativa entre os Parques Eólicos de Beberibe e de Fleixeiros I. Neste estudo, foram coletadas informações da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) e aplicação de formulários nos municípios de Beberibe e Trairi. Os resultados no âmbito socioambiental estão relacionados aos desgastes das vias de acesso, descaracterização da paisagem natural e redução da fauna e flora. Por outro lado, os impactos econômicos envolvem a geração de empregos e elevação da renda das empresas de comércio local e de prestação de serviços hoteleiros, ao passo que os tecnológicos compreendem a grande capacidade de produção de energia pelas torres de maior altura.

Retomando os trabalhos que abordam a relação entre a instalação de plantas eólicas e as repercussões econômicas, Gonçalves, Rodrigues e Chagas (2020) estimaram o impacto dos parques geradores de energia dos ventos sobre o mercado de trabalho brasileiro nos anos de 2004 a 2016. Utilizando a metodologia de Diferenças em Diferenças (DID) escalonada, os autores concluíram que essas plantas aumentam as ocupações na indústria, agricultura e construção. Os pesquisadores também verificaram a existência de efeitos positivos no emprego e salários dos trabalhadores com menos escolaridade e das pequenas e médias empresas.

Em um estudo sobre os conflitos socioambientais decorrentes da instalação de usinas eólicas no sertão da Paraíba, Brasil, Cunha *et al.* (2022) realizaram uma pesquisa de campo e discutiram as diretrizes implementadas para o licenciamento desses complexos nos municípios de Santa Luzia, São José do Sabugi e Junco do Seridó em 2021. A partir de visitas à área estudada, observou-se a presença de alterações parciais no solo, desmatamento e desequilíbrios na fauna e flora. Dessa forma, concluiu-se que o discurso ambiental de energia limpa tem omitido grandes práticas de desmatamento, degradação do solo, danos aos recursos hídricos e poluição da paisagem, aspectos que poderiam ser mitigados se houvesse uma fiscalização adequada.

Enquanto Irffí *et al.* (2025) averiguaram os efeitos da construção de parques eólicos sobre o mercado de trabalho e variáveis econômicas nos municípios do Nordeste brasileiro favorecidos pelo Fundo de Desenvolvimento do Nordeste (FDNE). Com base em dados de 1999 a 2022 e aplicando o modelo de DID, os autores constataram uma elevação significativa no emprego (23,41%), PIB *per capita* (20,89%) e VAB industrial (105,24%) e de serviços (10,78%). Em contrapartida, verificou-se efeitos negativos temporários no setor agrícola (-8,92%), que desapareceram depois da conclusão dos empreendimentos.

Considerando-se as evidências disponíveis na literatura, a presente pesquisa visa contribuir ao considerar as consequências da instalação de usinas eólicas sobre o meio ambiente dos municípios do Nordeste que receberam essas plantas. O desmatamento de grandes faixas de terras, e, conseqüentemente, a perda de vegetação natural, podem ocasionar sérios desequilíbrios ambientais. As ações mencionadas impedem o alcance de um desenvolvimento regional sustentável e comprometem a qualidade de vida das populações atuais e futuras.

3. Estratégia empírica

3.1 Dados

Os dados de vegetação natural utilizados na pesquisa referem-se à área de cobertura natural, em hectares (ha), e divide-se em floresta (formação florestal, formação savânica, mangue, floresta alagável e/ou restinga arbórea) e formação natural não florestal (campo alagado e área pantanosa, formação campestre, apicum, afloramento rochoso, restinga herbácea e/ou outras formações não florestais). Essas variáveis foram extraídas do MapBiomias Brasil, organização vinculada ao Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima (OC), para os anos de 1996 a 2022 (MapBiomias, 2023a).

As áreas de florestas são referidas como aquelas que possuem árvores (porte grande e tronco lenhoso). Enquanto a formação natural não florestal é denominada de vegetação herbácea e arbustiva, com predominância de ervas (porte pequeno e sem estrutura lenhosa) e arbustos (porte pequeno e tronco lenhoso fino) (MapBiomias, 2023b; MapBiomias, 2023c). Dessa forma, a variável dependente, neste estudo, é a proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal, dado que os tipos de cobertura natural diferem entre os municípios. Esse indicador foi calculado a partir da soma dessas duas classes e divisão pela cobertura total, com o termo vegetação natural empregado para descrever os espaços com formações nativas.

Por outro lado, as covariáveis utilizadas correspondem a densidade populacional (população dividido por área em km²), precipitação média anual (mm) e proporção de área

agropecuária (ha) (área agropecuária dividido pela área total), ambas expressas para o ano de 1997 e retiradas, respectivamente, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018), extraído de Saldanha *et al.* (2024), que é um conjunto de dados meteorológicos com disponibilidade mensal e interpolados em uma grade com resolução espacial de 0,04° x 0,04°; e MapBiomias (2023a).

A justificativa para o uso de controles fixos está respaldada em Callaway e Sant'Anna (2021). Os autores afirmam que o modelo de DID escalonado deve considerar covariáveis pré-tratamento relacionadas à evolução dos resultados da variável dependente nos períodos de pós-tratamento, uma vez que covariáveis pós-tratamento podem ser afetadas pelo próprio tratamento. Em um exemplo com dados reais, eles buscam avaliar o efeito da política de salário mínimo sobre o emprego de adolescentes em nível de condados de 2001 a 2007, incluindo os seguintes controles: população do condado em 2000, renda média de 1997, fração da população abaixo do nível de pobreza de 1997, fração da população que é branca em 1990 e características educacionais de 1990. Com base nisso, as variáveis de controle, neste trabalho, são referentes a 1997, ano anterior a construção do primeiro parque eólico nos municípios nordestinos.

A densidade populacional, precipitação e área agropecuária são importantes variáveis de controle para a vegetação natural. Lazaretti e Souza (2019) e Friede (2022) asseguram que o crescimento populacional é o principal responsável pela degradação e desequilíbrio ambiental. Enquanto Becerra, Shimabukuro e Alvalá (2009) e Becerra, Carvalho e Ometto (2015) argumentam que uma menor precipitação acarreta em uma maior sensibilidade da vegetação ao estresse hídrico, sugerindo uma relação positiva entre esses dois indicadores. Por sua vez, o MapBiomias (2023d) relata que o avanço da agropecuária é explicado principalmente pelo desmatamento, com conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas.

As informações sobre o ano e município de construção das usinas eólicas foram retiradas do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024). Essa base de dados apresenta detalhes apenas dos empreendimentos que se encontram em operação, construção e construção não iniciada, além das datas de entrada em operação e início e fim da vigência de outorga. Nesse sentido, o município é considerado como tratado a partir do ano de início da vigência de outorga do primeiro parque eólico instalado³, devido à ausência de informações sobre a data em que começou sua construção e tendo em vista que Irffi *et al.* (2025) sustentam que a construção desses empreendimentos somente pode ocorrer após essa outorga. Além disso, foram excluídos aqueles sem data de início de funcionamento e vigência da outorga disponíveis (Brejinho (RN), Fortaleza (CE) e Pindoretama (CE)), bem como os desativados (Fernando de Noronha (PE)). Os municípios com ausência dessas datas na base de dados da ANEEL (2024) estão classificados com tipo de atuação do empreendimento em registro e não autorização, o que pode explicar a indisponibilidade dessa informação.

Até o ano de 2022, 103 municípios do Nordeste contavam com parques eólicos em atividade (ANEEL, 2024), sendo considerados como grupo de tratamento nesta pesquisa. O modelo principal considera como grupo de controle os municípios vizinhos imediatos (226 municípios) dos que dispõem de usinas dessa natureza e que não possuem parques eólicos instalados, uma vez que apresentam características climáticas e socioeconômicas semelhantes (Rodrigues *et al.*, 2019; Sampaio; Costa; Irffi, 2023). Apesar disso, também foram realizadas estimativas tendo em vista os vizinhos de primeiro e segundo grau (536 municípios), vizinhos

³ Para Umburanas (BA), São Gonçalo do Amarante (CE), Cabo de Santo Agostinho (PE) e Cururupu (MA) não haviam informações sobre o ano de vigência da outorga do primeiro parque eólico instalado. Sendo assim, foi considerado o ano de construção presente, respectivamente, em ABEEólica (2019), Centro da Memória da Eletricidade no Brasil (2018), Global Energy Monitor (2022) e Diniz *et al.* (2008) como início do tratamento desses municípios.

de segundo grau (310 municípios) e mesma mesorregião (1.054 municípios) como controle, conforme ilustrados na Figura 1.

Adicionalmente, a literatura indica a exclusão de municípios com potência outorgada de geração de energia eólica menor ou igual a 100 kW, pois esses parques não são construídos com finalidade comercial (Gonçalves; Rodrigues; Chagas, 2020; Sampaio; Costa; Irfi, 2023). Com base nas informações da ANEEL (2024), verificou-se a presença somente de dois municípios com essa característica, Umburanas (BA) (0,16 kW) e Cururupu (MA) (22,50 kW). Em função disso, foram estimados modelos com e sem aqueles com potência de geração de energia menor ou igual a 100 kW.

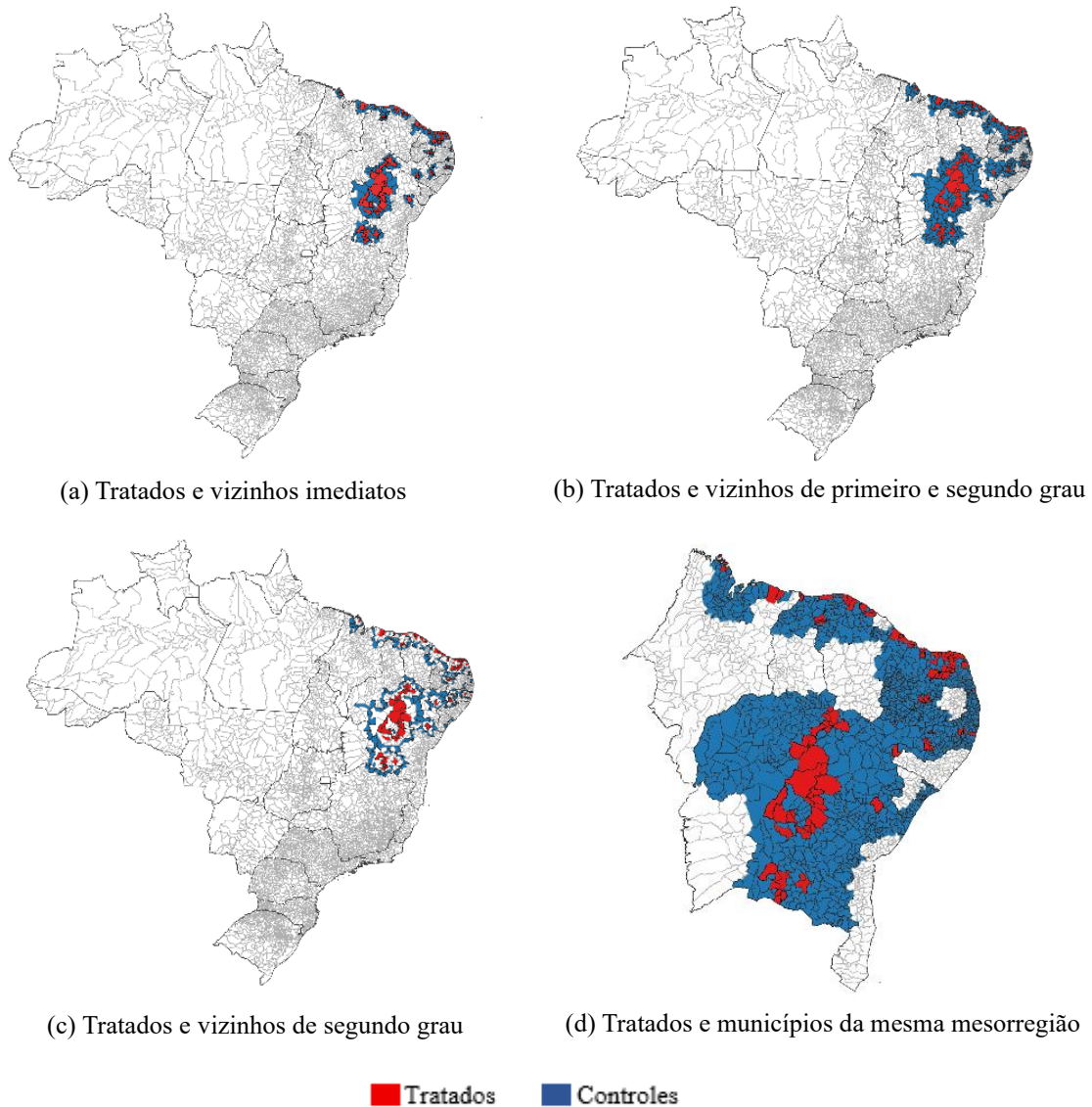


Figura 1 - Municípios com parques eólicos instalados no Nordeste e seus vizinhos imediatos, vizinhos de primeiro e segundo grau, vizinhos de segundo grau e mesma mesorregião

As estatísticas descritivas para todas as variáveis utilizadas neste estudo estão descritas na Tabela 1. As colunas (1), (2), (3), (4) e (5) exibem, respectivamente, o número de observações, média, desvio padrão, mínimo e máximo dos indicadores de vegetação natural, densidade populacional, precipitação média anual e proporção de área agropecuária para os municípios com parques eólicos na região Nordeste (tratados) e seus vizinhos imediatos (não tratados). Esses valores são descritos para todos os municípios com usinas eólicas e apenas aqueles com potência de geração de energia maior que 100 kW, bem como os vizinhos

imediatos desses grupos. Para a variável dependente, vegetação natural, os dados são referentes aos anos de 1996 a 2022, enquanto para as covariáveis foram utilizadas informações de 1997.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas para os municípios com parques eólicos no Nordeste (tratados) e seus vizinhos imediatos (não tratados)

Variáveis	Observações	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Não tratados					
Vegetação natural	6.102	0,5305	0,2292	0,0159	0,9872
Vegetação natural (potência > 100 kW)	5.967	0,5224	0,2252	0,0159	0,9872
Densidade populacional	226	59,1893	218,3984	1,6012	2.497,1589
Densidade populacional (potência > 100 kW)	221	60,0951	220,7794	1,6012	2.497,1589
Precipitação média anual	226	64,8310	21,4708	27,4507	131,1097
Precipitação média anual (potência > 100 kW)	221	63,6660	20,1728	27,4507	119,6377
Proporção de área agropecuária	226	0,4194	0,2528	0,0075	0,9722
Proporção de área agropecuária (potência > 100 kW)	221	0,4286	0,2481	0,0078	0,9722
Tratados					
Vegetação natural	2.781	0,5641	0,1795	0,0503	0,9287
Vegetação natural (potência > 100 kW)	2.727	0,5590	0,1773	0,0503	0,9264
Densidade populacional	103	35,7486	49,0102	1,8731	321,9358
Densidade populacional (potência > 100 kW)	101	36,1054	49,4156	1,8731	321,9358
Precipitação média anual	103	59,9447	19,9706	25,8657	108,2394
Precipitação média anual (potência > 100 kW)	101	59,6991	19,4563	25,8657	108,2394
Proporção de área agropecuária	103	0,3509	0,2111	0,0065	0,9382
Proporção de área agropecuária (potência > 100 kW)	101	0,3557	0,2099	0,0246	0,9382

Nota: A variável de vegetação natural (ha) refere-se à proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal para os anos de 1996 a 2022. As variáveis de densidade populacional (população/km²), precipitação média anual (mm) e proporção de área agropecuária (ha) são referentes ao ano de 1997.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do IBGE, Saldanha *et al.* (2024) e MapBiomias (2023a).

A proporção de áreas médias de floresta e formação natural não florestal são ligeiramente maiores para os tratados em comparação com os não tratados em todas as especificações e anos avaliados, com uma diferença pequena de mais de 3%. Por outro lado, as variáveis de controle apresentam valores médios superiores nos municípios vizinhos imediatos daqueles com parques eólicos, principalmente para a densidade populacional. Ademais, os valores mínimos e máximos indicam assimetrias municipais refletidas em todos os indicadores, com uma diferença consideravelmente alta entre os limites extremos.

3.2 Modelo empírico e identificação

A abordagem utilizada para avaliar o impacto da construção de parques eólicos sobre a vegetação natural dos municípios da região Nordeste do Brasil é o método de Diferenças em

Diferenças (DID) escalonado desenvolvido por Callaway e Sant’Anna (2021). Essa estratégia está baseada, principalmente, nas seguintes suposições: (1) variações no tempo de tratamento; (2) múltiplos períodos de tempo; e (3) existência de tendências paralelas em períodos anteriores ao tratamento (Callaway; Sant’Anna, 2021). A utilização desse método ocorreu porque com escalonamento o Estimador de Diferenças em Diferenças de Efeitos Fixos (TWFE) pode produzir estimativas enviesadas, dada a presença de heterogeneidade no tratamento e tendo em vista que tratados antecipadamente são controle durante alguns períodos para tratados tardiamente (Goodman-Bacon, 2021).

Dessa forma, uma estimativa de DID é a diferença entre a mudança nos resultados antes e após uma intervenção em um grupo (tratados) em comparação com outro que não recebeu esse tratamento (controle). A partir do pressuposto de tendências comuns, um DID de dois grupos e dois períodos apresenta o efeito médio do tratamento nos tratados, intitulado de *Average Treatment Effect on Treated (ATT)*. Contudo, uma parte considerável de aplicações diferem dessa estrutura convencional, uma vez que os tratamentos acontecem em momentos distintos. A tradicional regressão com disponibilidade de dados longitudinais para unidades analisadas corresponde a (Goodman-Bacon, 2021; Athey; Imbens, 2022):

$$Y_{m,t} = \beta^{DID} D_{m,t} + \alpha_m + \rho_t + \varepsilon_{m,t} \quad (1)$$

onde: $Y_{m,t}$ refere-se ao resultado do município m , no ano t ; β^{DID} é o estimador de DID; $D_{m,t}$ diz respeito a variável de tratamento; α_m e ρ_t representam, respectivamente, o efeito fixo de município e tempo; e $\varepsilon_{m,t}$ é o termo de erro.

Dado que os resultados potenciais (Y_t) não podem ser verificados para todos os municípios simultaneamente, a ênfase reside, geralmente, na identificação e estimativa de alguns efeitos médios causais. O ATT apropriado para essa configuração com vários grupos de tratamento e múltiplos períodos de tempo pode ser visualizado na equação 2, denominado de efeito de tratamento médio de grupo-tempo. Particularmente, utiliza-se o efeito médio do tratamento para municípios integrantes de um determinado grupo (g) e tempo (t). Ademais, o $ATT(g, t)$ não estabelece restrição à heterogeneidade do efeito de tratamento entre grupos ou ao longo do tempo. Isso significa que focar no conjunto de $ATT(g, t)$ ’s possibilita a análise de como os efeitos médios do tratamento variam em diferentes dimensões unificadamente (Callaway; Sant’Anna, 2021):

$$ATT(g, t) = \mathbb{E}[Y_t(g) - Y_t(0) | G_g = 1] \quad (2)$$

Conforme evidencia Callaway e Sant’Anna (2024), em muitos estudos, como é o caso dessa pesquisa, os pesquisadores podem ter um número relativamente grande de grupos e períodos de tempo, o que inviabiliza a interpretação de muitos efeitos de tratamento médios de grupo-tempo. Como também, a inferência estatística deste efeito é mais tênue com grupos pequenos, uma vez que o tamanho da amostra para a estimação das mudanças nos resultados ao longo do tempo em um grupo é igual ao número de observações pertencentes a ele. Isso dificulta a possibilidade de resultados assintóticos gerar boas aproximações à distribuição amostral. Como alternativa, é recomendando concentrar-se somente nos parâmetros agregados do efeito do tratamento, como o tipo dinâmico. Essa abordagem fornece os efeitos médios do tratamento em diferentes durações de sua exposição e os resultados são mais estáveis ao utilizar a quantidade total de municípios tratados como tamanho da amostra.

Por fim, é importante comprovar a consistência e confiabilidade das evidências obtidas pelo método adotado por meio de alguns testes de robustez: (1) avaliação da consistência do efeito do tratamento ao utilizar diferentes grupos de controle, como municípios vizinhos de

primeiro e segundo grau e mesma mesorregião daqueles com parques eólicos; (2) verificação de uma possível contaminação do grupo de comparação principal ao estimar um modelo apenas com os vizinhos de segundo grau como contrafactual, tendo em vista que devido à proximidade geográfica, os vizinhos imediatos podem ser afetados indiretamente pela instalação desses empreendimentos; (3) inclusão de municípios com parques eólicos em fase de construção, além daqueles que se encontram em operação, de acordo com Irffi *et al.* (2025); (4) inserção de municípios tratados como controle em períodos anteriores ao início do seu tratamento, conforme realizado em Irffi *et al.* (2025), denominado de “ainda não tratado”; e (5) aplicação do *Propensity Score Matching (PSM)* para seleção de contrafactuais mais comparáveis com os tratados.

O PSM é uma metodologia utilizada em estudos onde as unidades observadas não são escolhidas de forma aleatória. Essa questão dificulta a comparação direta entre os grupos de tratamento e controle por diferirem sistematicamente entre si. Os escores de balanceamento podem ser empregados para resolver esse problema ao agrupar observações tratadas e não tratadas semelhantes (Rosenbaum; Rubin, 1983). Em outras palavras, define-se essa técnica como a probabilidade de que uma unidade na amostra de municípios tratados e não tratados receba o tratamento, a partir de um conjunto de indicadores definidos (Heinrich; Maffioli; Vázquez, 2010).

Nessa pesquisa, para selecionar os municípios vizinhos imediatos mais comparáveis aos tratados pela abordagem exposta acima, empregou-se a variável indicadora de microrregião; o indicador principal para implementação de um empreendimento eólico, a velocidade média do vento de 1997 (m/s) (ano anterior a instalação da primeira usina no Nordeste) do conjunto de dados TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018), obtida de Saldanha *et al.* (2024); e o método de pareamento 1:1 (cada unidade tratada foi pareada com apenas uma unidade não tratada com base no valor mais próximo do escore de propensão).

4. Resultados

4.1 Impacto da construção de parques eólicos sobre a vegetação natural

Os resultados das estimações do modelo principal deste trabalho são apresentados na Tabela 2, a seguir. O método aplicado corresponde ao modelo de Diferenças em Diferenças (DID) escalonado elaborado por Callaway e Sant’Anna (2021). A variável dependente refere-se às áreas de vegetação natural, expressas na forma de logaritmo para os anos de 1996 a 2022. As estimativas da especificação base consideram os municípios com parques eólicos que entraram em operação até 2022 como tratados e seus vizinhos imediatos como controle. Nesse sentido, as colunas (1) e (2) exibem, respectivamente, os resultados para todos os municípios tratados observando apenas os efeitos fixos de unidade e tempo, e efeitos fixos de unidade e tempo mais a inclusão de variáveis de controle (densidade populacional, precipitação média anual e proporção de área agropecuária). Por outro lado, as colunas (3) e (4) expõem as mesmas estimações, mas considerando somente os tratados com potência outorgada de geração de energia eólica maior que 100 kW, configurando-se na exclusão de Cururupu (MA) e Umburanas (BA).

A linha identificada como “Parques eólicos” descreve os coeficientes de interesse, ou seja, o *Average Treatment Effect on Treated (ATT)* geral. Todas as especificações apresentaram significância estatística de 5% e impacto negativo do tratamento, com aquelas controladas apenas por efeitos fixos exibindo um coeficiente de 5,91% para o caso de todos os tratados e 6,05% para os que possuem potência acima de 100 kW. No entanto, os impactos mais completos são verificados quando as covariáveis, que também podem afetar a variável dependente, estão incluídas. Esses parâmetros indicam uma redução, em relação à média, de 5,89% e 5,53% da vegetação natural em decorrência da construção de parques eólicos nos municípios da região

Nordeste, tendo em vista todos os municípios e os com potência maior que 100 kW, nessa ordem. Isso significa que em termos absolutos e dado a média de áreas de vegetação natural dos municípios tratados no ano pré-tratamento mais próximo, 1997, equivalente a 79.796,51 hectares para todos os tratados e 78.872,64 hectares para aqueles com potência acima de 100 kW, ocorreu uma diminuição, respectivamente, de 4.700,01 ha e 4.361,66 ha de cobertura natural ocasionada pela implantação desses complexos.

Tabela 2 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Especificação de referência

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0591** (0,0275)	-0,0589** (0,0221)	-0,0605** (0,0271)	-0,0553** (0,0227)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	8.883	8.883	8.694	8.694

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significante. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

Alguns estudos presentes na literatura internacional e nacional sobre os efeitos das usinas eólicas na vegetação natural também obtiveram resultados semelhantes, apesar da utilização de metodologias distintas. Em uma pesquisa elaborada para o norte da China, Tang *et al.* (2017) constataram que essas atividades são responsáveis por conter o crescimento da vegetação, demonstrado pelas reduções em índices de área foliar (14,5%), vegetação aprimorada (14,8%) e diferença normalizada (8,9%). Enquanto Qin *et al.* (2022), em uma análise para os Estados Unidos, observaram uma diminuição da vegetação em 59% dos parques durante a sua construção. Com diferenças pouco expressivas, Aksoy *et al.* (2023) identificaram mudanças na vegetação em sete classes de cobertura do solo nas áreas de instalação e controle de usinas eólicas na Turquia, como florestas de coníferas, matas de transição e pastagens naturais.

Para a realidade brasileira, os trabalhos se concentram em investigações descritivas, como os de Costa *et al.* (2019) e Cunha *et al.* (2022), mas com impactos observados análogos aos verificados neste ensaio. No que diz respeito ao primeiro, foram detectados consequência ambientais adversas provocadas pela implantação e operação dos parques de Beberibe e Fleixeiras I, estado do Ceará. Esses efeitos são percebidos principalmente na descaracterização da paisagem natural e redução da fauna e flora. Ao passo que o segundo realizou uma avaliação da instalação de plantas de geração de energia através dos ventos no sertão da Paraíba, mostrando práticas de desmatamento acelerado, erosão do solo e comprometimento dos recursos naturais (hídricos, fauna e flora).

4.2 Robustez

Esta subseção apresenta os testes de robustez realizados para verificar se os resultados obtidos são consistentes a diferentes especificações e avaliar a sua confiabilidade. Essa verificação compreende a utilização de diferentes grupos de controle, como vizinhos de primeiro e segundo grau, mesma mesorregião e vizinhos de segundo grau daqueles com parques eólicos implantados, sendo este último utilizado, sobretudo, com o propósito de englobar municípios mais distantes e possivelmente não contaminados pelo tratamento; inclusão de municípios com empreendimentos de geração de energia eólica em construção, além dos que estão em operação; seleção de controles mais comparáveis com os tratados a partir da inserção dos “ainda não tratados” em períodos anteriores ao tratamento e emprego do método de *Propensity Score Matching (PSM)*.

4.2.1 Diferentes grupos de controle

A Tabela 3 expõe os resultados encontrados ao considerar os vizinhos de primeiro e segundo grau dos municípios que possuem parques eólicos como contrafactual, com o intuito de observar se os sinais e magnitudes se mantêm ou são sensíveis a escolha do grupo de comparação, ou seja, se o efeito ocorre apenas em um único grupo. De maneira semelhante aos impactos identificados no modelo principal, demonstrado na tabela anterior (Tabela 2), todas as abordagens foram estatisticamente significantes. Estas revelaram, em uma descrição do modelo mais completo (colunas (2) e (4)), um efeito negativo da instalação de plantas eólicas sobre a vegetação natural no Nordeste, de 5,00% quando estão inseridos os tratados em sua totalidade e 4,62% ao excluir as unidades com potência menor ou igual a 100 kW.

Tabela 3 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Vizinhos de primeiro e segundo grau como controle

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0618** (0,0276)	-0,0500** (0,0193)	-0,0641** (0,0260)	-0,0462** (0,0218)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	17.253	17.253	16.875	16.875

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significativa. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

Em uma segunda análise, a Tabela 4 evidencia os valores estimados com os municípios da mesma mesorregião daqueles com usinas de produção de eletricidade a partir dos ventos como contrafactual, tendo em vista também a importância de conferir a manutenção dos impactos a diferentes unidades de comparação. Similarmente às outras especificações, os coeficientes são significantes e indicam uma consequência negativa da construção desses

empreendimentos nas áreas de vegetação natural, sendo de 6,25% e 6,35% (casos com inserção de efeitos fixos e variáveis de controle) ao contemplar o conjunto integral dos tratados e somente os com potência maior que 100 kW, respectivamente.

Tabela 4 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Municípios da mesma mesorregião como controle

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0572** (0,0243)	-0,0625** (0,0214)	-0,0577** (0,0262)	-0,0635** (0,0228)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	31.239	31.239	31.185	31.185

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significante. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

Com a finalidade de constatar, principalmente, se ocorreu uma contaminação do grupo de controle principal (vizinhos imediatos) pelo tratamento devido à proximidade geográfica com os tratados e, conseqüentemente, uma subestimação dos resultados, realizou-se uma estimação considerando os vizinhos de segundo grau como controle. Os parâmetros, exibidos na Tabela 5, não apontaram grandes divergências em relação aos outros modelos obtidos, uma vez que apresentam coeficientes significantes e negativos em todas as abordagens, manifestando um impacto adverso da implantação de parques eólicos na vegetação natural dos municípios nordestinos detentores dessa atividade.

Tabela 5 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Vizinhos de segundo grau como controle

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0638** (0,0279)	-0,0476** (0,0232)	-0,0666** (0,0272)	-0,0430** (0,0216)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	11.151	11.151	10.908	10.908

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significativa. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

A utilização de diferentes grupos de controle é um exercício importante para averiguar se os resultados encontrados no modelo principal são mantidos somente com um contrafactual específico ou continuam válidos com outros municípios não tratados. Ademais, ao considerar os vizinhos de segundo grau como controle, além de corresponder a um grupo alternativo, também pode ser empregado para verificar a ocorrência de possíveis efeitos indiretos do tratamento em municípios mais próximos aos tratados. Portanto, os parâmetros de todas as especificações realizadas nesta subseção revelaram-se consistentes com a especificação de referência, reforçando sua validade.

4.2.2 Parques eólicos em construção

O conjunto de dados da ANEEL sobre os empreendimentos de geração de energia contém informações acerca do estágio atual da usina, ou seja, se está em construção não iniciada, construção ou operação. Com o objetivo de observar se os municípios com plantas eólicas em fase de implementação, mesmo sem conclusão integral do processo de instalação, influenciam as evidências constatadas na pesquisa, incluiu-se no estudo aqueles com usinas em construção até 2021, em razão do ano limite dos dados utilizados (2022).

Tabela 6 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Inclusão de municípios com parques eólicos em construção e vizinhos imediatos como controle

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0643** (0,0264)	-0,0587** (0,0225)	-0,0657** (0,0260)	-0,0547** (0,0224)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	9.396	9.396	9.207	9.207

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significativa. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

A ANEEL (2024) informa que apenas quatro novos municípios estão nessa etapa para o período avaliado: Jacaraci (BA), Currais Novos (RN), Pedra Preta (RN) e Pocinhos (PB), com início da vigência de outorga em 2020 para o primeiro e 2021 para os três últimos. Dessa forma, a Tabela 6 mostra que os resultados permanecem estatisticamente significantes e destacando

um impacto negativo de 5,87% (todos os tratados, efeitos fixos e variáveis de controle) e 5,47% (tratados com mais de 100 kW, efeitos fixos e variáveis de controle) da instalação desses complexos sobre as áreas de vegetação natural no Nordeste.

4.2.3 Grupos de controle semelhantes aos tratados

A Tabela 7 exhibe os coeficientes obtidos ao estimar o modelo com inserção de municípios “ainda não tratados” como contrafactual, além dos vizinhos imediatos, uma vez que Callaway e Sant’Anna (2024) afirmam que essa é outra opção para o grupo de comparação. Os autores explicam que o “ainda não tratado” compreende as unidades que nunca foram tratadas e as que em um dado momento ainda não se encontram em tratamento. Adicionalmente, inserir municípios tratados como controles em períodos anteriores ao início do seu tratamento torna as unidades comparativas ainda mais semelhantes, pois estão inclusas as próprias observações que possuem parques eólicos. Ao aplicar essa seleção, os valores estimados se mostraram consistentes em relação a estimativa principal, com coeficientes significativos e negativos.

Tabela 7 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Inserção de municípios ainda não tratados como controle, além dos vizinhos imediatos

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0592** (0,0269)	-0,0586** (0,0233)	-0,0606** (0,0294)	-0,0550** (0,0219)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	8.883	8.883	8.694	8.694

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significante. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

Em uma última análise e visando também a determinação de contrafactuais mais comparáveis com os tratados, aplicou-se o método de *Propensity Score Matching (PSM)* para identificar os vizinhos imediatos com característica similares ao grupo de tratamento a partir da variável determinante para a escolha do local de construção de usinas eólicas, a velocidade média do vento, e o indicador de microrregião. Essa avaliação permite a utilização de municípios que poderiam receber tais instalações como controles, mas que não possuem, reduzindo, assim, as divergências entre tratados e não tratados. De maneira análoga as outras estimações realizadas, a Tabela 8 expõe que os coeficientes permanecem significantes e revelando um efeito adverso da implantação desses empreendimentos na vegetação natural.

Tabela 8 - Impacto da construção de parques eólicos nos municípios da região Nordeste sobre as áreas de vegetação natural - Municípios de controle via *Propensity Score Matching (PSM)*

	Variável dependente: Vegetação Natural (em logaritmo)			
	Todos os tratados		Tratados com potência maior que 100 kW	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Parques eólicos	-0,0582** (0,0289)	-0,0698** (0,0309)	-0,0614** (0,0301)	-0,0688** (0,0319)
EF município	Sim	Sim	Sim	Sim
EF ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de controle	Não	Sim	Não	Sim
Observações	5.562	5.562	5.454	5.454

Nota: Todos os modelos foram estimados considerando erros *clusterizados* ao nível de município e erro padrão apresentado entre parêntese. ** equivale a significância de 5% (intervalo de confiança de 95% e que não inclui zero) e sua ausência significa não significativa. Parques eólicos diz respeito ao ATT geral que calcula a média dos efeitos do tratamento em todos os períodos de exposição ao tratamento. A variável dependente é o logaritmo natural da proporção de áreas de floresta e formação natural não florestal. As variáveis de controle são o logaritmo natural da densidade populacional, logaritmo natural da precipitação média anual e o logaritmo natural da proporção de área agropecuária.

Com base no exposto em toda a subseção de robustez, depreende-se que os efeitos da construção de parques eólicos nas áreas de vegetação natural dos municípios nordestinos são robustos a diferentes especificações, o que pode indicar a confiabilidade dos resultados apresentados. Diante disso e apoiado no que argumentam Araújo e Moura (2017), mesmo que essa fonte geradora de energia disponha de vantagens em relação aos combustíveis não renováveis e poluentes, existe uma multiplicidade de impactos negativos ocasionados pela sua instalação e que precisam ser considerados, pois influenciam o meio ambiental e social. Portanto, ela ainda não pode ser completamente reconhecida como limpa e sustentável, principalmente no que se refere aos impactos causados durante a implantação da infraestrutura necessária para a geração de eletricidade através do vento.

5. Considerações finais

O aumento da demanda por energia e a preocupação com suas fontes de produção acarretou grandes debates e propostas de alternativas sustentáveis para substituir ou reduzir a utilização de combustíveis fósseis, pois emitem gases causadores do efeito estufa e prejudiciais ao meio ambiente. Devido isso e dado o avanço das mudanças climáticas e o aquecimento global no mundo, a energia eólica surge como uma possibilidade de mitigar os impactos adversos provocados por fontes de geração elétrica não renováveis. Contudo, a construção de parques eólicos ocasiona consequências ambientais consideráveis, principalmente na etapa de instalação da sua infraestrutura. Esta fase requer o desmatamento de faixas de terra e, conseqüentemente, supressão da vegetação natural, além de erosão do solo, redução da fauna e alterações hidrológicas.

No Brasil, atrelado aos problemas motivados pelo uso de combustíveis fósseis, está a importância de garantir a segurança energética da população, tendo em vista que o país depende, sobretudo, de usinas hidrelétricas para o seu fornecimento, com históricos de crises no segmento e secas persistentes que influenciam o suprimento interno. A energia eólica, nesse caso, ganhou visibilidade por possuir capacidade para atenuar esses dois desafios, encontrando-

se no Nordeste as melhores características para receber esses complexos, como a maior estabilidade e velocidade do vento, e, então, a maioria dos parques eólicos brasileiros.

Nesse sentido, a presente pesquisa analisou o impacto da construção de parques eólicos sobre as áreas de vegetação natural dos municípios do Nordeste que dispõem dessa tecnologia a partir de um método apropriado para lidar com períodos de tratamento distintos, o DID escalonado proposto por Callaway e Sant’Anna (2021). Os resultados do modelo principal (tratados e vizinhos imediatos) apontaram uma redução de cerca de 6% da vegetação natural dos municípios nordestinos devido a construção desses empreendimentos. Essa especificação foi reforçada com base na realização de uma sequência de testes de robustez, que continuaram indicando um efeito negativo do tratamento, como vizinhos de primeiro e segundo grau, mesma mesorregião e apenas vizinhos de segundo grau como grupo de controle; inclusão de municípios em fase de implantação das usinas; “ainda não tratado” como contrafactual em períodos anteriores ao início do tratamento; e seleção de contrafactuais pela metodologia de *PSM*.

Dessa forma, constata-se que a instalação de plantas eólicas pode suprimir áreas de vegetação natural. O desmatamento de coberturas nativas acentua o desequilíbrio ambiental, mudanças climáticas e aquecimento global em curso no planeta. Embora o percentual verificado neste estudo sugira uma redução pequena quando comparado com os benefícios da geração de eletricidade por meio dos ventos, em termos absolutos e considerando a média de área de vegetação natural no ano anterior à implementação do primeiro parque eólico (1997), uma diminuição de 6% equivale a uma perda de mais de 4 mil hectares de vegetação nativa.

Portanto, indica-se a criação de estratégias que objetivem a mitigação das consequências causadas pela construção desses complexos sobre o meio ambiente local, como o reflorestamento dos espaços desmatados. Ademais, essa pesquisa contribuiu com a literatura existente sobre o tema, principalmente no contexto brasileiro, ao fornecer uma análise quantitativa da influência de parques eólicos sobre o meio ambiente, baseada em um conjunto de indicadores importantes (florestas, formação natural não florestal, densidade populacional, precipitação e área agropecuária), metodologia apropriada e região que detêm mais de 90% das usinas instaladas no Brasil. Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo da viabilidade da adoção de técnicas de georreferenciamento, com a finalidade de captar apenas os espaços onde esses empreendimentos foram construídos.

Referências

ABATZOGLOU, J. T. *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Brasília: ANEEL, 2024.

AKSOY, T. *et al.* Impacts of wind turbines on vegetation and soil cover: a case study of Urla, Cesme, and Karaburun Peninsulas, Turkey. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 1, p. 51-68, 2023.

ARAÚJO, A. A.; MOURA, G. J. B. de. A literatura científica sobre os impactos causados pela instalação de parques eólicos: análise cienciométrica. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 13, n. 28, p. 207-223, maio/ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Conjunto Eólico Umburanas entra em operação comercial na Bahia**. São Paulo: ABEEólica, 2019.

_____. **Infovento**. São Paulo: ABEEólica, 2025.

ATHEY, S.; IMBENS, G. W. Design-based analysis in Difference-in-Differences settings with staggered adoption. **Journal of Econometrics**, v. 226, n. 1, p. 62-79, 2022.

- BARCELLA, M. dos S.; BRAMBILLA, F. R. Energia eólica e os impactos socioambientais: estudo de caso em parque eólico do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 5-18, 2012.
- BECERRA, J. A. B.; CARVALHO, S. de; OMETTO, J. P. H. B. Relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma Caatinga: abordagem multitemporal. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Centro de Convenções de João Pessoa, 2015. p. 6668-6674.
- BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. dos S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 125-134, 2009.
- BEZERRA, F. D. **Energia eólica no Nordeste**. Fortaleza: ETENE, 2019.
- CALLAWAY, B.; SANT'ANNA, P. H. C. Difference-in-Differences with multiple time periods. **Journal of Econometrics**, v. 225, n. 2, p. 200-230, 2021.
- _____. **Getting Started with the did Package**. 2024. Disponível em: vignettes/did-basics.Rmd. Acesso em: 27 jun. 2025.
- CASTRO, N. J. de *et al.* **Perspectivas para a energia eólica no Brasil**. Rio de Janeiro: GESEL, 2010.
- CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL. **Parque Eólico de Taíba**. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2018.
- COSTA, M. A. de S. *et al.* Impactos socioeconômicos, ambientais e tecnológicos causados pela instalação dos parques eólicos no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 34, n.3, p. 399-411, 2019.
- CUNHA, A. L. X. *et al.* Análise dos impactos ambientais causados pela implantação de parques eólicos no Seridó Paraibano. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 11, n. 16, p. e70111638050-e70111638050, 2022.
- DAI, K. *et al.* Environmental issues associated with wind energy - A review. **Renewable Energy**, v. 75, p. 911-921, mar. 2015.
- DHAR, A. *et al.* Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. **Science of the Total Environment**, v. 718, p. 134602, maio 2020.
- DINIZ, L. F. L. *et al.* Projeto Lençóis - Estágio atual e desafios vencidos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2., 2008, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2008. p. 1-9.
- EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA). **Powering Europe: wind energy and the electricity grid**. Brussels: EWEA, 2010.
- FARIA, B. L.; JUSTINO, F. B. Estudo do Impacto do Aquecimento Global no Potencial Eólico do Nordeste Brasileiro. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Paraná, v. 13, n. 2, p. 257-269, jul./dez. 2011.
- FRIEDE, R. Aumento populacional e degradação ambiental: a conta que não quer fechar. **Revista do Ministério Público do Estado do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, v. 84, p. 133-146, abr./jun. 2022.
- GLOBAL ENERGY MONITOR. **Caminho da Praia wind farm**. Covina: Global Energy Monitor, 2022.

- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global wind energy outlook 2008**. Brussels: GWEC, 2008.
- GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 2003.
- GONÇALVES, S.; RODRIGUES, T. P.; CHAGAS, A. L. S. The impact of wind power on the Brazilian labor market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, p. 109887, ago. 2020.
- GOODMAN-BACON, A. Difference-in-Differences with variation in treatment timing. **Journal of Econometrics**, v. 225, n. 2, p. 254-277, dez. 2021.
- HEINRICH, C.; MAFFIOLI, A.; VÁZQUEZ, G. **A Primer for Applying Propensity-Score Matching**. Washington: IDB, 2010.
- IRFFI, G. *et al.* Evaluation of the impact of FDNE financing on the construction of wind farms and its effects on the labor market and economic indicators of municipalities in Sudene's area of operation. **Revista Cadernos de Finanças Públicas**, Brasília, Edição Especial, p. 1-28, 2025.
- JONG, P. de *et al.* Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid. **Applied Energy**, v. 195, p. 538-555, jun. 2017.
- JONG, P. de *et al.* Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 526-535, jul. 2013.
- JONG, P. de; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 725-739, dez. 2015.
- JUNFENG, L; PENGFEI, S.; HU, G. **China wind power outlook 2010**. Bélgica: GWEC, 2010.
- LAZARETTI, L. R.; SOUZA, O. T. de. População e meio ambiente: uma análise de acoplamento para o caso brasileiro (1991-2014). **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 101-119, 2019.
- LEUNG, D. Y. C.; YANG, Y. Wind energy development and its environmental impact: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 1031-1039, jan. 2012.
- MAPBIOMAS. **MapBiomass - Coleção 8 da série 2023 de Mapas de Cobertura e Transições Municípios e Biomas do Brasil**. 2023a. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 3 ago. 2024.
- _____. **Brasil além das florestas: a vegetação herbácea e arbustiva nos biomas**. 2023b. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/11/FACT_MapBiomass_Nao_Florestais_22.11_v6.pdf. Acesso em: 29 jun. 2025.
- _____. **Brasil perdeu 16% de sua vegetação não florestal nos últimos 38 anos**. 2023c. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/11/24/brasil-perdeu-16-de-sua-vegetacao-nao-florestal-nos-ultimos-38-anos/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- _____. **Área de agropecuária no Brasil cresceu 50% nos últimos 38 anos**. 2023d. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/10/06/area-de-agropecuaria-no-brasil-cresceu-50-nos-ultimos-38-anos/#:~:text=Novos%20dados%20do%20MapBiomass%20cobrindo,%2C6%25%20do%20territ%C3%B3rio%20nacional>. Acesso em: 3 jul. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Energia e meio ambiente**: Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2032. Brasília: MME, 2022.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B. de; CUNHA, S. K. da. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cadernos EBAPE.BR**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 630-651, set. 2012.

NAZIR, M. S. *et al.* Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm - a review. **Science of the Total Environment**, v. 683, p. 436-444, set. 2019.

NAZIR, M. S. *et al.* Potential environmental impacts of wind energy development: a global perspective. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 13, p. 85-90, fev. 2020.

OLIVEIRA, A. M. de; SELLITTO, M. A.; FLORES, J. de S. Impactos econômicos, sociais e ambientais da geração de energia eólica em comunidades do Rio Grande do Norte. **REUNIR: Revista de Administração, Ciências Contábeis e Sustentabilidade**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 107-119, 2022.

QIN, Y. *et al.* Impacts of 319 wind farms on surface temperature and vegetation in the United States. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, p. 024026, 2022.

RINTZEL, L. T.; ALVES, T. W; MASSUQUETTI, A. Análise dos impactos econômicos decorrentes da instalação dos parques eólicos nos municípios da Região Sul do Brasil. *In*: ENCONTRO DE ECONOMIA DA REGIÃO SUL, 20., 2017, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: PUCRS, 2017. p. 1-20.

RODRIGUES, R. E. de A. *et al.* Efeitos da construção de parques eólicos sobre indicadores econômicos e fiscais dos municípios brasileiros. *In*: ENCONTRO REGIONAL DE ECONOMIA, 24., 2019, Fortaleza, Ceará. **Anais [...]**. Fortaleza: Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia (ANPEC), 2019. p. 1-19.

ROSENBAUM, P. R.; RUBIN, D. B. The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. **Biometrika**, v. 70, n. 1, p. 41-55, 1983.

SALDANHA, R. *et al.* **brclimr**: fetch zonal statistics of weather indicators for brazilian municipalities. R package version 0.2.0. 2024. Disponível em: <https://github.com/rfsaldanha/brclimr>, <https://rfsaldanha.github.io/brclimr/>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SAMPAIO, K. R. A.; BATISTA, V. O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2021.

SAMPAIO, M. A. dos S.; COSTA, E. M.; IRFFI, G. A implementação de parques eólicos e seus impactos sobre os municípios brasileiros. *In*: ENCONTRO REGIONAL DE ECONOMIA, 28., 2023, Fortaleza, Ceará. **Anais [...]**. Fortaleza: Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia (ANPEC), 2023. p. 1-23.

SPELLMAN, F. R. **Environmental impacts of renewable energy**. New York: CRC Press, 2014.

TANG, B. *et al.* The observed impacts of wind farms on local vegetation growth in northern China. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 332-343, 2017.

XIA, G.; ZHOU, L. Detecting wind farm impacts on local vegetation growth in Texas and Illinois using MODIS vegetation greenness measurements. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 698-713, 2017.