

**VENTILAÇÃO
ATMOSFÉRICA E
OCORRÊNCIA DE
SÍNDROMES
RESPIRATÓRIAS AGUDAS
GRAVES (SRAG) NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO:
EVIDÊNCIAS DE LIMIARES
CRÍTICOS E IMPLICAÇÕES
PARA A VIGILÂNCIA
EPIDEMIOLÓGICA (2020–
2022)**

**ATMOSPHERIC VENTILATION AND THE OCCURRENCE OF SEVERE ACUTE
RESPIRATORY ILLNESS (SARI) IN THE BRAZILIAN SEMIARID REGION:
EVIDENCE OF CRITICAL THRESHOLDS AND IMPLICATIONS FOR
EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE (2020–2022)**

Victor Marccone Teixeira Dias da Silva¹

Karen Ruggeri Saad²

Luis Alberto Valotta³

RESUMO

Este estudo ecológico analisou a relação entre a velocidade média e máxima do vento e a ocorrência de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022. O estudo utilizou 244.702 casos do SIVEP-Gripe e dados meteorológicos de 116 estações do INMET, aplicando análises descritivas, correlação de Spearman e regressão segmentada sob abordagens frequentista e bayesiana. Os resultados identificaram limiares críticos de ventilação em aproximadamente 2,0 m/s para velocidade média e 6,5 m/s para velocidade máxima. Observou-se que 63,6% dos casos ocorreram em meses com velocidade média inferior a 2,0 m/s e 80,4% em meses com velocidade máxima inferior a 6,5 m/s, associando-se a reduções médias mensais de 19,7% e 51,3%, respectivamente, quando esses limiares foram superados. Os achados sugerem que a ventilação atmosférica pode representar um indicador ambiental operacional relevante para a vigilância epidemiológica no Semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Epidemiologia ambiental; Vigilância epidemiológica; Síndrome Respiratória Aguda Grave; Ventilação atmosférica; Semiárido brasileiro.

ABSTRACT

This ecological study analyzed the relationship between mean and maximum wind speed and the occurrence of Severe Acute Respiratory Illness (SARI) in the Brazilian semiarid region between 2020 and 2022. The study used 244,702 cases from SIVEP-Gripe and meteorological data from 116 INMET stations, applying descriptive analyses, Spearman correlation, and segmented regression under frequentist and Bayesian approaches. The results identified critical ventilation thresholds of approximately 2.0 m/s for mean wind speed and 6.5 m/s for maximum wind speed. It was observed that 63.6% of cases occurred during months with mean wind speed below 2.0 m/s

and 80.4% during months with maximum wind speed below 6.5 m/s, being associated with average monthly reductions of 19.7% and 51.3%, respectively, when these thresholds were exceeded. The findings suggest that atmospheric ventilation may represent a relevant operational environmental indicator for epidemiological surveillance in the Brazilian semiarid region.

Keywords: Environmental epidemiology; Epidemiological surveillance; Severe Acute Respiratory Illness; Atmospheric ventilation; Brazilian semiarid region.

1. INTRODUÇÃO

As infecções respiratórias agudas (IRAs) constituem um dos mais persistentes desafios para os sistemas de saúde pública em escala global. Seu espectro clínico abrange desde quadros leves e autolimitados até formas graves que comprometem o parênquima pulmonar, culminando na Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG), condição associada a elevada morbimortalidade e maior impacto sobre populações vulneráveis, como idosos, crianças pequenas, gestantes, imunocomprometidos e indivíduos com comorbidades crônicas (Brasil, 2023; World Health Organization, 2023).

No contexto brasileiro, a vigilância da SRAG é mandatória e contínua, sendo o Sistema de Informação da Vigilância Epidemiológica da Gripe (SIVEP-Gripe) o principal instrumento para monitoramento da circulação viral e da gravidade dos casos (Brasil, 2023; Organização Pan-Americana da Saúde, 2020). Essa estrutura integra o Sistema Único de Saúde (SUS) e se relaciona diretamente aos princípios da vigilância coletiva e da determinação social da saúde, reconhecendo que os processos de adoecimento não decorrem exclusivamente de

fatores biológicos, mas também de condicionantes ambientais, territoriais e sociais (Buss; Pellegrini Filho, 2007).

A transmissão dos principais agentes etiológicos associados às IRAs e à SRAG ocorre predominantemente por via aérea, especialmente por meio da emissão e inalação de aerossóis respiratórios capazes de permanecer suspensos no ambiente por períodos prolongados (Morawska; Cao, 2020; Fennelly, 2020). Evidências consolidadas durante a pandemia de COVID-19 reforçaram o papel central da ventilação ambiental na dispersão, diluição e remoção dessas partículas, tornando a dinâmica atmosférica um componente potencialmente relevante na modulação coletiva do risco de transmissão respiratória (Marr; Tang, 2021; Şahin, 2020).

Em condições de baixa circulação do ar, a renovação atmosférica tende a ser limitada, favorecendo maior permanência local de aerossóis potencialmente infecciosos. Em contrapartida, ventos mais intensos promovem aumento da turbulência atmosférica e maior dispersão horizontal e vertical das partículas suspensas, reduzindo sua concentração ambiental média (Morawska *et al.*, 2009; Vejerano; Marr, 2018). Apesar dessa plausibilidade biofísica, a ventilação atmosférica ainda permanece relativamente subexplorada em estudos epidemiológicos territoriais sobre SRAG, sobretudo quando comparada a variáveis meteorológicas clássicas, como temperatura e umidade relativa (Shaman; Kohn, 2009).

Assim, a presente investigação parte da compreensão de que variáveis ambientais devem ser interpretadas como componentes contextuais capazes de modular condições coletivas de exposição, vulnerabilidade e circulação de aerossóis em escala territorial.

Nesse contexto, o Semiárido brasileiro emerge como um território particularmente relevante para investigação epidemiológica ambiental. Mais do que uma delimitação geográfica ou climática, a região caracteriza-se pela sobreposição entre vulnerabilidades ambientais, desigualdades históricas de infraestrutura e limitações estruturais no acesso aos serviços de saúde, elementos que influenciam diretamente os processos de adoecimento coletivo e a distribuição desigual dos riscos sanitários (Buss; Pellegrini Filho, 2007; Barcellos *et al.*, 2009).

Do ponto de vista climático, o Semiárido apresenta regime pluviométrico irregular, elevadas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e frequente presença de material particulado atmosférico, condições potencialmente favoráveis à rápida evaporação de gotículas respiratórias e à formação de aerossóis de menor diâmetro, capazes de permanecer suspensos no ambiente por períodos prolongados (Marengo *et al.*, 2017; Morawska; Cao, 2020). Embora a dinâmica real da transmissão respiratória dependa da interação entre múltiplos fatores biológicos, sociais e ambientais, tais características podem contribuir para padrões diferenciados de dispersão e permanência de partículas respiratórias em escala coletiva, especialmente em contextos de baixa renovação atmosférica.

Além das condições climáticas, a região concentra importantes vulnerabilidades socioeconômicas, incluindo elevados índices de pobreza, limitações de infraestrutura sanitária e dificuldades de acesso aos serviços especializados de saúde, fatores que potencialmente ampliam a sensibilidade populacional a surtos de doenças respiratórias e aumentam a pressão sobre sistemas locais

de vigilância e assistência (Buss; Pellegrini Filho, 2007; Barcellos *et al.*, 2009).

Dessa forma, a investigação da ventilação atmosférica como componente ambiental potencialmente associado à dinâmica da SRAG no Semiárido brasileiro possui relevância não apenas científica, mas também operacional. A identificação de limiares atmosféricos críticos pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias complementares de vigilância epidemiológica territorial baseadas em dados meteorológicos públicos, favorecendo a antecipação de períodos de maior vulnerabilidade coletiva e subsidiando ações regionalizadas de prevenção e resposta em saúde pública (Muggeo, 2003).

Apesar do crescente reconhecimento da importância da transmissão aérea nas infecções respiratórias, permanecem escassos estudos capazes de identificar limiares atmosféricos operacionalmente aplicáveis à vigilância epidemiológica em regiões semiáridas de elevada vulnerabilidade socioambiental.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar a relação entre a velocidade média (VME) e a velocidade máxima (VMA) do vento e a ocorrência de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) nos municípios que compõem o Semiárido brasileiro oficial, no período de janeiro de 2020 a dezembro de 2022. A investigação foi conduzida a partir de uma abordagem integrada de epidemiologia ambiental e análise territorial, com ênfase na identificação de possíveis limiares atmosféricos associados à dinâmica da doença, utilizando modelos estatísticos segmentados sob os paradigmas frequentista e bayesiano (Muggeo, 2003; Gelman *et al.*, 2013; Salvatier; Wiecki; Fonnesbeck, 2016).

2. METODOLOGIA

2.1. Desenho do Estudo

Trata-se de um estudo ecológico do subtipo misto, combinando uma abordagem de tendência temporal (*time-trend ecological study*) com uma análise de agregados espaciais (municípios). O estudo é de natureza quantitativa e foi desenhado para investigar a associação entre a exposição ambiental - quantificada pelas variáveis de ventilação atmosférica (VME e VMA) - e o desfecho em saúde populacional, representado pela ocorrência mensal de casos de SRAG no território do Semiárido brasileiro, ao longo do período de janeiro de 2020 a dezembro de 2022.

2.1.1. Justificativa Epistemológica do Delineamento Ecológico

A escolha do delineamento ecológico fundamenta-se na natureza coletiva e territorial das variáveis analisadas. A ventilação atmosférica constitui um fenômeno ambiental que opera em escala populacional, influenciando padrões coletivos de dispersão, renovação e permanência de partículas em suspensão no ambiente (Pearce, 2000). Dessa forma, sua investigação demanda uma abordagem analítica compatível com processos contextuais e agregados, e não exclusivamente individuais.

Tal perspectiva é particularmente relevante em investigações de epidemiologia ambiental, nas quais exposições climáticas frequentemente apresentam comportamento espacialmente heterogêneo e temporalmente dinâmico, dificultando interpretações lineares simplificadas (Barcellos *et al.*, 2009).

Nesse sentido, o estudo não busca estabelecer relações causais diretas entre exposição individual ao vento e adoecimento por SRAG, mas identificar padrões espaço-temporais compatíveis com hipóteses de modulação ambiental da transmissão aérea. A utilização do delineamento ecológico permite analisar a interação entre clima, território e dinâmica epidemiológica em larga escala, particularmente em regiões marcadas por heterogeneidade ambiental e vulnerabilidade social, como o Semiárido brasileiro (Susser, 1994; Buss; Pellegrini Filho, 2007).

Sob essa perspectiva, a ventilação atmosférica é compreendida no presente estudo não como determinante causal isolado da ocorrência de SRAG, mas como componente ecológico inserido em uma rede complexa de fatores ambientais, sociais e epidemiológicos capazes de modular padrões coletivos de exposição e transmissão respiratória em escala territorial.

2.2. Unidade de Análise e Território de Abrangência

A unidade de análise territorial para a agregação dos dados foi o conjunto dos municípios oficialmente reconhecidos como pertencentes ao Semiárido brasileiro. Para assegurar a máxima aderência às condições climáticas definidoras da região e evitar vieses decorrentes da inclusão de áreas de transição ou com características distintas, foi adotada a delimitação mais atualizada e formal, estabelecida pela Resolução CONDEL/SUDENE nº 176, de 3 de janeiro de 2024. Esta delimitação abrange um total de 1.477 municípios, distribuídos por nove Unidades da Federação: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Minas Gerais (região Norte e vales do Jequitinhonha e Mucuri), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE). A adoção deste critério

territorial estrito foi fundamental para garantir a validade interna do estudo, evitando que associações espúrias fossem geradas pela inclusão de dados de municípios com regimes climáticos distintos (e.g., regiões litorâneas úmidas ou áreas de transição para o Cerrado).

2.3. Fontes de Dados e Critérios de Seleção

Dados Epidemiológicos (SRAG): Os dados relativos aos casos de Síndrome Respiratória Aguda Grave foram obtidos por meio de *download* público da base de dados do Sistema de Informação da Vigilância Epidemiológica da Gripe (SIVEP-Gripe), gerenciado pelo Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS) do Ministério da Saúde do Brasil. A base original de abrangência nacional, referente ao período de 2020 a 2022, continha 1.082.641 registros de notificação.

Os seguintes critérios de inclusão foram aplicados sequencialmente:

1. Registro classificado como "confirmado" para SRAG, independentemente do agente etiológico identificado ou do desfecho clínico.
2. Data de início dos sintomas (DIS) compreendida entre 1º de janeiro de 2020 e 31 de dezembro de 2022.
3. Município de residência do paciente validado como pertencente à lista oficial dos 1.477 municípios do Semiárido, conforme critério SUDENE 2024.

Os critérios de exclusão adotados foram:

1. Registros com município de residência classificado como "ignorado", "em branco" ou cujo nome não pôde ser inequivocamente associado a um código de município do IBGE.
2. Registros duplicados, identificados por meio do número único de notificação ou, na ausência deste, por uma combinação de variáveis (data de nascimento, sexo, município de residência e data de início dos sintomas).
3. Registros com data de início dos sintomas inválida (e.g., data posterior à data de notificação ou de encerramento, ou data fora do intervalo plausível).

Após a aplicação rigorosa destes critérios, a base de dados final de SRAG para o Semiárido brasileiro foi reduzida para um total de 244.702 casos confirmados para o triênio. É importante destacar que o próprio SIVEP-Gripe, enquanto sistema de vigilância de base sindrômica, está sujeito a limitações intrínsecas, como subnotificação, atraso na digitação e variações na completude e qualidade do preenchimento das fichas entre diferentes municípios e regiões.

Dados Meteorológicos: Os dados de velocidade do vento foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através de sua plataforma de acesso público, o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Foram extraídos os registros diários de duas variáveis para todas as estações meteorológicas (convencionais e automáticas) disponíveis no território nacional para o período de estudo: Velocidade Média do

Vento (VME) e Velocidade Máxima do Vento (VMA), ambas expressas em metros por segundo (m/s).

Os critérios para inclusão de uma estação meteorológica na análise foram:

1. A estação deveria apresentar uma taxa de completude de dados diários superior a 75% para ambas as variáveis (VME e VMA) em cada um dos anos do triênio 2020–2022.
2. Após o processo de pareamento territorial, a estação deveria estar inequivocamente localizada dentro dos limites de um município classificado como pertencente ao Semiárido.
3. Os registros diários foram submetidos a um controle de qualidade básico para exclusão de valores implausíveis, definidos como $VME > 15 \text{ m/s}$ ou $VMA > 25 \text{ m/s}$.

Inicialmente, foram identificadas 235 estações com registros no BDMEP para o período. Após a aplicação dos critérios de completude e do processo de vinculação territorial, um total de 116 estações meteorológicas foram consideradas válidas e incluídas nas análises subsequentes.

2.4. Tratamento, Padronização e Vinculação das Bases

A integração das bases de dados epidemiológica e meteorológica representou um desafio técnico significativo, uma vez que estas utilizam identificadores territoriais não padronizados. O SIVEP-Gripe emprega o nome do município de residência, frequentemente sujeito a variações ortográficas, erros de digitação, uso de abreviações ou grafias antigas. O INMET, por sua vez, identifica suas

estações por um código alfanumérico, associado a um nome de localidade (que pode ou não coincidir com o nome do município sede).

Para viabilizar a vinculação precisa, foi conduzido um meticuloso processo de harmonização e pareamento, composto pelas seguintes etapas:

1. **Padronização Textual:** Os nomes dos municípios em ambas as bases foram submetidos a uma rotina de limpeza e padronização, que incluiu: conversão de todos os caracteres para caixa alta; remoção de acentos, tremas, cedilhas e demais sinais diacríticos; remoção de pontuação (vírgulas, pontos, hífen); e substituição de variações comuns (e.g., "SAO" para "SÃO", "D' " para "D", "STO" para "SANTO"). Exemplo: "Belém de São Francisco" -> "BELEM DE SAO FRANCISCO".
2. **Pareamento Exato (*Exact Matching*):** Inicialmente, foi realizada uma tentativa de vinculação direta entre os nomes padronizados. Estações cujo nome padronizado correspondia exatamente ao nome de um município do Semiárido (e pertencente à mesma UF) foram automaticamente vinculadas.
3. **Pareamento Probabilístico (*Fuzzy Matching*):** Para os casos remanescentes, sem correspondência exata, foi empregada uma técnica de *fuzzy matching* baseada no cálculo da distância de Levenshtein, uma métrica que quantifica a similaridade entre duas cadeias de caracteres pelo número mínimo de operações (inserções, deleções ou substituições) necessárias para transformar uma *string* na outra. Foi utilizado

um limiar mínimo de similaridade de **90%**. Além disso, foi exigida a correspondência obrigatória da Unidade da Federação (UF) para aceitar o pareamento, a fim de evitar falsas associações entre municípios homônimos ou com nomes similares em estados diferentes.

4. **Validação Manual:** Uma amostra aleatória de 10% dos pareamentos realizados (tanto exatos quanto *fuzzy*) foi submetida a uma inspeção visual e verificação manual por dois pesquisadores independentes, utilizando mapas e consultas a *gazetteers* oficiais, para aferir a acurácia do processo. O índice de acerto foi superior a 97%.

A estratégia de vinculação territorial adotada permitiu elevada compatibilidade espacial entre os registros epidemiológicos e meteorológicos, reduzindo distorções frequentemente observadas em estudos ecológicos baseados em agregações territoriais amplas. A utilização combinada de padronização textual, pareamento probabilístico e validação manual fortaleceu a consistência da base analítica, assegurando maior aderência entre os padrões atmosféricos observados e os contextos populacionais efetivamente analisados.

Após a vinculação, os dados diários de velocidade do vento de cada uma das 116 estações selecionadas foram agregados em médias mensais. Para os poucos municípios que continham mais de uma estação meteorológica válida, foi calculada a média aritmética simples entre os valores mensais das estações para representar o município. A opção pela agregação mensal foi baseada na compatibilidade com a escala temporal da variável desfecho (notificação mensal de SRAG), na adequação para a análise de

padrões sazonais e na redução do "ruído" estatístico associado à alta variabilidade diária do vento.

2.5. Organização e Estratificação dos Dados

Os dados foram estruturados em um painel mensal, onde cada linha da base final representa um mês-calendário (e.g., janeiro de 2020) e contém as seguintes informações agregadas para o conjunto do Semiárido:

- Contagem total de casos de SRAG no mês.
- Média mensal da VME (calculada como a média das médias das 116 estações).
- Média mensal da VMA (calculada de forma análoga à VME).
- Variáveis de estratificação temporal (ano, mês, trimestre, estação do ano).

Embora a análise anual apresente 12 unidades temporais mensais, cada mês não corresponde a uma observação simples, mas à consolidação ecológica de registros epidemiológicos e meteorológicos previamente agregados. A base epidemiológica final incluiu 244.702 casos de SRAG no Semiárido brasileiro, enquanto a base meteorológica partiu de 235 estações do INMET, das quais 116 foram validadas após critérios de completude, controle de qualidade e vinculação territorial. Assim, o *n* mensal representa a unidade analítica final do painel ecológico, construída a partir da integração de séries diárias e múltiplas estações, e não o volume bruto de dados observacionais disponíveis.

Essa estruturação permitiu compatibilizar a escala temporal dos registros de SRAG com as variáveis meteorológicas, reduzir a variabilidade diária do vento e evidenciar padrões sazonais em nível coletivo. Portanto, os resultados devem ser interpretados como padrões ecológicos mensais de associação climato-epidemiológica, e não como estimativas individuais ou diárias de risco.

Para as análises do perfil sociodemográfico, os casos de SRAG foram estratificados segundo as variáveis disponíveis no SIVEP-Gripe:

- Sexo: Masculino, Feminino, Ignorado.
- Faixa Etária: Agregada em intervalos decenais (menor que 1 ano, 1-10, 11-20, ..., 81-90, maior que 90 anos).
- Raça/Cor: Conforme categorias do IBGE (Parda, Branca, Preta, Amarela, Indígena, Ignorado/Vazio).

Registros com a informação classificada como "Ignorado" ou "Vazio" para sexo e raça/cor foram mantidos para o cálculo do total geral de casos, mas foram excluídos das análises estatísticas estratificadas por essas variáveis, visando preservar a consistência comparativa. O percentual de dados ausentes (*missing data*) foi de aproximadamente 0,04% para sexo, 0,02% para idade e 14,7% para raça/cor.

2.6. Análise Estatística

A estratégia de análise de dados foi planejada de forma progressiva, iniciando por abordagens descritivas e exploratórias e evoluindo para modelos estatísticos mais complexos e robustos para testar a hipótese de não linearidade e identificar limiares.

1. **Análise Descritiva e Exploratória:** Foram calculadas estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mediana, valores mínimo e máximo) para as variáveis VME, VMA e contagem mensal de SRAG, apresentadas de forma consolidada para o triênio e estratificadas por ano. Séries temporais mensais foram construídas e plotadas em gráficos para inspeção visual de tendências, sazonalidade e possíveis sincronidades entre as variáveis meteorológicas e epidemiológicas. Diagramas de dispersão foram utilizados para explorar visualmente a forma da relação bivariada entre ventilação e SRAG.
2. **Análise de Correlação:** A suposição de normalidade das distribuições das variáveis contínuas foi avaliada por meio do **teste de Shapiro-Wilk**. Como a hipótese nula de normalidade foi rejeitada para parte das variáveis meteorológicas e/ou contagens de casos em alguns anos ($p < 0,05$), optou-se pela utilização de um método não paramétrico robusto. A associação monotônica entre as variáveis de ventilação (VME, VMA) e a contagem mensal de casos de SRAG foi quantificada pelo coeficiente de **correlação de Spearman (ρ)**. A força da correlação foi classificada conforme os seguintes critérios: $|\rho| < 0,50$ (fraca), $0,50 \leq |\rho| < 0,70$ (moderada) e $|\rho| \geq 0,70$ (forte). O nível de significância estatística adotado foi $\alpha = 0,05$.
3. **Regressão Linear Simples:** Para estabelecer uma linha de base comparativa e avaliar a plausibilidade de uma associação linear contínua, foram ajustados modelos de **Regressão Linear Simples**, tendo a contagem mensal de SRAG como variável resposta e, alternadamente, VME e VMA como variáveis preditoras. Os modelos foram ajustados para cada ano separadamente (2020, 2021, 2022) e para o conjunto de

dados consolidado do triênio. Foram extraídos e reportados os coeficientes angulares (β), os coeficientes de determinação (R^2) e os respectivos valores-p.

4. **Regressão Segmentada (Identificação de Limiares):** Com base na hipótese *a priori* de que a relação entre ventilação e transmissão de SRAG é, provavelmente, não linear - ou seja, que existe um ponto de inflexão a partir do qual a força e/ou a direção da associação mudam -, a regressão segmentada foi empregada como técnica analítica central. Esta técnica permite a estimação de pontos de quebra (*breakpoints*) que marcam mudanças estruturais na função de regressão. Foram implementados dois enfoques complementares:

- **Regressão Segmentada Frequentista:** Esta abordagem foi conduzida utilizando a metodologia proposta por Muggeo (2003), implementada no ambiente estatístico R através do pacote *segmented*. O método ajusta modelos lineares generalizados com relações quebradas (piecewise linear relationships), utilizando um algoritmo iterativo para estimar a localização dos pontos de quebra. Foram testados modelos com um e dois pontos de quebra para cada variável de ventilação (VME e VMA). A seleção do modelo com melhor ajuste e parcimônia foi baseada no Critério de Informação de Akaike (AIC), com valores mais baixos indicando melhor compromisso entre ajuste e complexidade.
- **Regressão Segmentada Bayesiana:** Como uma estratégia de validação e para incorporar formalmente a incerteza na estimativa dos limiares, foi implementado

um modelo de regressão segmentada bayesiana. Esta análise foi realizada em ambiente Python, utilizando a biblioteca *PyMC* (versão 5.0) para inferência probabilística. A estimação dos parâmetros do modelo (interceptos, coeficientes angulares dos segmentos, ponto de quebra e variância residual) foi realizada por meio de Cadeias de Markov via Monte Carlo (MCMC) com o algoritmo NUTS (*No-U-Turn Sampler*), uma variante eficiente do método Hamiltoniano de Monte Carlo. Foram especificadas distribuições *a priori* fracamente informativas para todos os parâmetros. O ponto de quebra (x_0), de interesse central, recebeu uma distribuição *a priori* uniforme cobrindo a amplitude observada da variável de ventilação. Foram executadas 4 cadeias independentes, cada uma com 2.000 iterações de aquecimento (*warm-up*) e 4.000 iterações de amostragem, totalizando 16.000 amostras da distribuição *a posteriori* conjunta. A convergência das cadeias foi diagnosticada por meio do critério R-hat (Gelman-Rubin), sendo considerados aceitáveis valores $\leq 1,01$. A incerteza associada à estimativa do ponto de quebra foi resumida por meio de Intervalos de Credibilidade de 95% (HDI - *Highest Density Interval*). A utilização do algoritmo NUTS (No-U-Turn Sampler), derivado do método Hamiltoniano de Monte Carlo, permitiu maior eficiência exploratória do espaço paramétrico e melhor estabilidade na estimação dos pontos de quebra. A convergência simultânea das cadeias independentes, associada aos baixos valores de R-hat e à estabilidade visual das distribuições posteriores, reforçou a robustez inferencial dos limiares estimados (Gelman *et al.*, 2013; Salvatier; Wiecki; Fonnesbeck, 2016).

- A adoção da abordagem bayesiana decorre da compreensão de que fenômenos ambientais e epidemiológicos apresentam elevada variabilidade e incerteza inerentes, especialmente em análises ecológicas de base territorial (Gelman *et al.*, 2013). Diferentemente da inferência frequentista clássica, a modelagem bayesiana permite estimar distribuições de probabilidade para os parâmetros de interesse, incorporando explicitamente a incerteza associada aos pontos de quebra identificados e permitindo interpretações probabilísticas mais compatíveis com sistemas ambientais complexos.
- No presente estudo, essa estratégia mostrou-se particularmente relevante para a identificação de limiares de ventilação atmosférica, uma vez que tais transições dificilmente se comportam como valores absolutos rígidos na dinâmica ambiental real. Assim, os limiares estimados devem ser interpretados como zonas probabilísticas de transição epidemiológica compatíveis com mudanças estruturais no comportamento da transmissão aérea.
- Essa perspectiva probabilística torna-se particularmente relevante em sistemas ecológicos complexos, nos quais variáveis ambientais raramente produzem efeitos lineares, homogêneos ou deterministicamente estáveis ao longo do território (Susser, 1994; Pearce, 2000). Em contextos climáticos dinâmicos, pequenas variações atmosféricas podem interagir com fatores sociais, estruturais e epidemiológicos de forma não uniforme,

tornando inadequada a interpretação de limiares como pontos absolutos e universalmente fixos (Barcellos *et al.*, 2009; Gelman *et al.*, 2013). Nesse sentido, a abordagem bayesiana permitiu incorporar a variabilidade inerente ao fenômeno analisado, favorecendo uma interpretação mais compatível com a natureza contextual e multifatorial da transmissão respiratória em escala populacional.

5. Classificação por Faixas de Ventilação e Análise de Impacto Operacional: A partir da convergência e da avaliação crítica das estimativas fornecidas pelos modelos frequentista e bayesiano, foram definidos limiares operacionais de referência para a velocidade do vento ($VME = 2,0 \text{ m/s}$; $VMA = 6,5 \text{ m/s}$). Com base nesses limiares, os meses do período de estudo foram classificados em duas categorias: "Ventilação Abaixo do Limiar Crítico" ($VME < 2,0 \text{ m/s}$ ou $VMA < 6,5 \text{ m/s}$) e "Ventilação Acima do Limiar Crítico". Para cada categoria, foram calculados o número total de casos de SRAG, o número de meses, a média mensal de casos e a proporção relativa de casos em relação ao total do triênio. Esta análise estratificada visou traduzir os achados estatísticos em métricas operacionalmente relevantes para a saúde pública.

2.7. Considerações Metodológicas e Limitações

A natureza ecológica do desenho de estudo é intrínseca à sua escala de análise e objetivo. É fundamental reconhecer que as associações estatísticas identificadas neste estudo se referem ao nível populacional e territorial, caracterizando a chamada "falácia ecológica" como um risco interpretativo. Portanto, os resultados não

podem ser diretamente inferidos para o nível individual (ou seja, não se pode afirmar que um indivíduo específico contraiu SRAG *porque* o vento estava fraco em seu município naquele mês). A força do estudo ecológico reside em sua capacidade de revelar padrões em larga escala e gerar hipóteses sobre determinantes contextuais (ambientais e sociais) da saúde, que podem então ser testadas com outros desenhos.

A utilização de dados secundários provenientes de sistemas de informação em saúde (SIVEP-Gripe) e de redes de monitoramento ambiental (INMET) impõe limitações inerentes. A qualidade, a completude e a acurácia dos registros epidemiológicos são sabidamente heterogêneas, refletindo as desigualdades na capacidade operacional das vigilâncias municipais. A subnotificação de casos, especialmente os mais leves que não demandam internação, é um fenômeno esperado. A alta proporção de dados faltantes para a variável raça/cor (14,7%) é uma limitação significativa para as análises de equidade e pode introduzir viés de seleção se a incompletude estiver sistematicamente associada a outras variáveis de interesse.

Uma limitação adicional relevante refere-se à escala de agregação temporal mensal. A transmissão de um vírus respiratório ocorre em escalas de tempo muito mais finas (horas a poucos dias). A agregação em médias mensais suaviza os extremos diários de vento, que podem ser cruciais. Por exemplo, um mês classificado como de "baixa ventilação" (média $< 2,0$ m/s) pode conter alguns dias com ventos muito fortes que poderiam ter dispersado aerossóis e interrompido cadeias de transmissão. Da mesma forma, um mês de "alta ventilação" pode ter vivenciado vários dias consecutivos de calmaria. Esta suavização pode ter atenuado a magnitude das

associações observadas, sugerindo que os efeitos reais podem ser ainda mais pronunciados. Estudos futuros com dados diários ou semanais e modelos de defasagem distribuída (*distributed lag models*) são necessários para refinar a compreensão da janela temporal crítica de exposição. Além disso, tanto a incidência de SRAG quanto a ventilação apresentam sazonalidade no Semiárido, e embora a análise segmentada ajude a identificar quebras na relação, o efeito independente da ventilação em relação a outros fatores sazonais (ex: comportamento humano) não pode ser completamente isolado neste desenho de estudo.

A metodologia adotada neste estudo foi conduzida em estrita conformidade com as recomendações da diretriz internacional **RECORD** (*REporting of studies Conducted using Observational Routinely-collected health Data*), que é uma extensão da declaração STROBE específica para pesquisas baseadas em dados de saúde coletados rotineiramente. Esta adesão visa garantir a máxima transparência na descrição dos critérios de seleção da amostra, dos procedimentos de tratamento e vinculação dos dados, da escolha dos métodos analíticos e da discussão das limitações inerentes ao uso de fontes de dados secundárias.

Por se tratar de uma análise de dados secundários, públicos, agregados e completamente anonimizados, sem qualquer possibilidade de identificação individual dos sujeitos, o presente estudo está em conformidade com a Resolução do Conselho Nacional de Saúde (CNS) nº 510, de 7 de abril de 2016, sendo dispensado de apreciação e aprovação por parte de um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP).

3. RESULTADOS

Caracterização Descritiva das Variáveis Meteorológicas e Epidemiológicas

A análise descritiva das variáveis de interesse ao longo do triênio 2020-2022 (**tabela 1**) revelou padrões de sazonalidade climática relativamente estáveis, contrastando com uma marcante variabilidade interanual na carga de doença por SRAG.

Tabela 1. Estatísticas descritivas da velocidade média do vento (VME), velocidade máxima do vento (VMA) e casos de SRAG no Semiárido brasileiro, por ano e para o triênio 2020-2022. Valores expressos como média $\pm$ desvio-padrão e intervalo mínimo--máximo.

Ano	VME (m/s)	VMA (m/s)	Casos SRAG (n)
2020	2,02 $\pm$ 0,34 (1,54–2,59)	6,38 $\pm$ 0,38 (5,65–7,02)	6.789 $\pm$ 4.348 (80–12.247)
2021	1,98 $\pm$ 0,27 (1,73–2,47)	6,29 $\pm$ 0,31 (5,64–6,60)	10.478 $\pm$ 7.310 (2.971–22.375)
2022	1,92 $\pm$ 0,33 (1,62–2,61)	6,28 $\pm$ 0,38 (5,61–7,01)	3.126 $\pm$ 2.891 (757–11.469)
Triênio	1,97 $\pm$ 0,31 (1,54–2,61)	6,32 $\pm$ 0,35 (5,61–7,02)	6.797 $\pm$ 5.885 (80–22.375)

Fonte: Elaboração própria.

Os dados meteorológicos agregados para o Semiárido brasileiro demonstraram relativa estabilidade das médias anuais de ventilação atmosférica ao longo do triênio analisado, com a velocidade média do vento (VME) variando entre 1,92 m/s e 2,02 m/s, e a velocidade máxima do vento (VMA) oscilando entre 6,28 m/s e 6,38 m/s. Em

2020, a média mensal de casos de SRAG foi de aproximadamente 6.789 registros. Em 2021, observou-se aumento da carga epidemiológica, com média mensal de 10.478 casos. Já em 2022, ocorreu redução das notificações, com média mensal próxima de 3.126 casos.

3.1. Perfil Sociodemográfico dos Casos Notificados de SRAG

A base epidemiológica final utilizada nas análises totalizou 244.702 registros confirmados de SRAG em residentes do Semiárido brasileiro entre os anos de 2020 e 2022 (**tabela 2**).

Tabela 2. Distribuição dos casos notificados de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022, segundo sexo e faixa etária.

Faixa Etária	Feminino (n)	Masculino (n)	Ignorado (n)	Total (n)	% do Total
< 1 ano	3.298	4.560	17	7.875	3,22%
1-10 anos	6.497	8.222	2	14.721	6,02%
11-20 anos	2.312	2.056	2	4.370	1,79%
21-30 anos	5.364	5.497	4	10.865	4,44%
31-40 anos	8.913	13.477	5	22.395	9,15%

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/ventilacao-atmosferica-e-ocorrencia-de-sindromes-respiratorias-agudas-graves-srag-no-semiarido-brasileiro-evidencias-de-limiar-criticos-e-implicacoes-para-a-vigilancia-epidemiologica-2020-2022?noblockage>

Fonte: Elaboração própria.

A distribuição dos casos segundo sexo revelou maior proporção de notificações entre indivíduos do sexo masculino, correspondendo a 54,11% do total de registros analisados, enquanto o sexo feminino representou 45,86% dos casos. Observou-se maior concentração de registros nas faixas etárias acima de 50 anos, especialmente entre 71 e 80 anos (16,82%), 61 e 70 anos (15,66%) e 51 e 60 anos (14,98%). Crianças apresentaram menor participação proporcional no conjunto de casos notificados, com 3,22% dos registros em menores de 1 ano e 6,02% entre indivíduos de 1 a 10 anos.

A distribuição dos casos segundo raça/cor no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022 encontra-se apresentada na **Tabela 3**. Observou-se predominância de registros classificados como pardos ao longo de todo o período analisado, seguidos por indivíduos brancos e pretos. Também foi identificada proporção relevante de registros classificados como “Ignorado” ou “Sem informação” para essa variável.

Tabela 3. Distribuição dos casos de SRAG por raça/cor e ano, Semiárido brasileiro (2020--2022).

Raça/Cor	2020 (n)	2021 (n)	2022 (n)	Total (n)	% do Ti
Amarela	1.236	1.432	417	3.085	1,26%
Branca	11.194	15.324	4.750	31.268	12,78%
Ignorado	10.264	18.108	5.194	33.566	13,72%
Indígena	164	212	128	504	0,21%
Parda	53.022	86.759	25.853	165.634	67,69%

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/ventilacao-atmosferica-e-ocorrencia-de-sindromes-respiratorias-agudas-graves-srag-no-semiarido-brasileiro-evidencias-de-limiar-criticos-e-implicacoes-para-a-vigilancia-epidemiologica-2020-2022?noblockage>

Fonte: Elaboração própria.

A distribuição por raça/cor evidenciou predominância de indivíduos autodeclarados pardos, correspondendo a 67,69% dos casos registrados no período analisado, seguidos por indivíduos brancos (12,78%) e pretos (3,35%). Observou-se ainda elevada proporção de registros classificados como “Ignorado” (13,72%) ou “Sem informação” (1,00%).

3.2. Análise Exploratória: Séries Temporais e Dispersão

As séries temporais mensais agrupadas (**Figura 1**) proporcionam uma visualização clara da sincronia inversa entre o regime de ventos e os picos de incidência de SRAG na região. Em 2020 e 2021, os “vales” nas curvas de VME e VMA (meses de março a maio) coincidiram temporalmente com os “picos” máximos de notificação de casos. Em 2022, embora a sazonalidade da ventilação se mantivesse, a curva de casos de SRAG mostrou-se achatada, com picos muito menos proeminentes, reforçando a hipótese do papel modulador dominante da imunidade vacinal neste último ano.

Figura 1. Séries temporais mensais agrupadas da velocidade média do vento (VME), velocidade máxima do vento (VMA) e casos de SRAG no Semiárido brasileiro, considerando o conjunto de meses

equivalentes (2020--2022). VME/VMA em m/s no eixo direito e SRAG em número absoluto no eixo esquerdo.

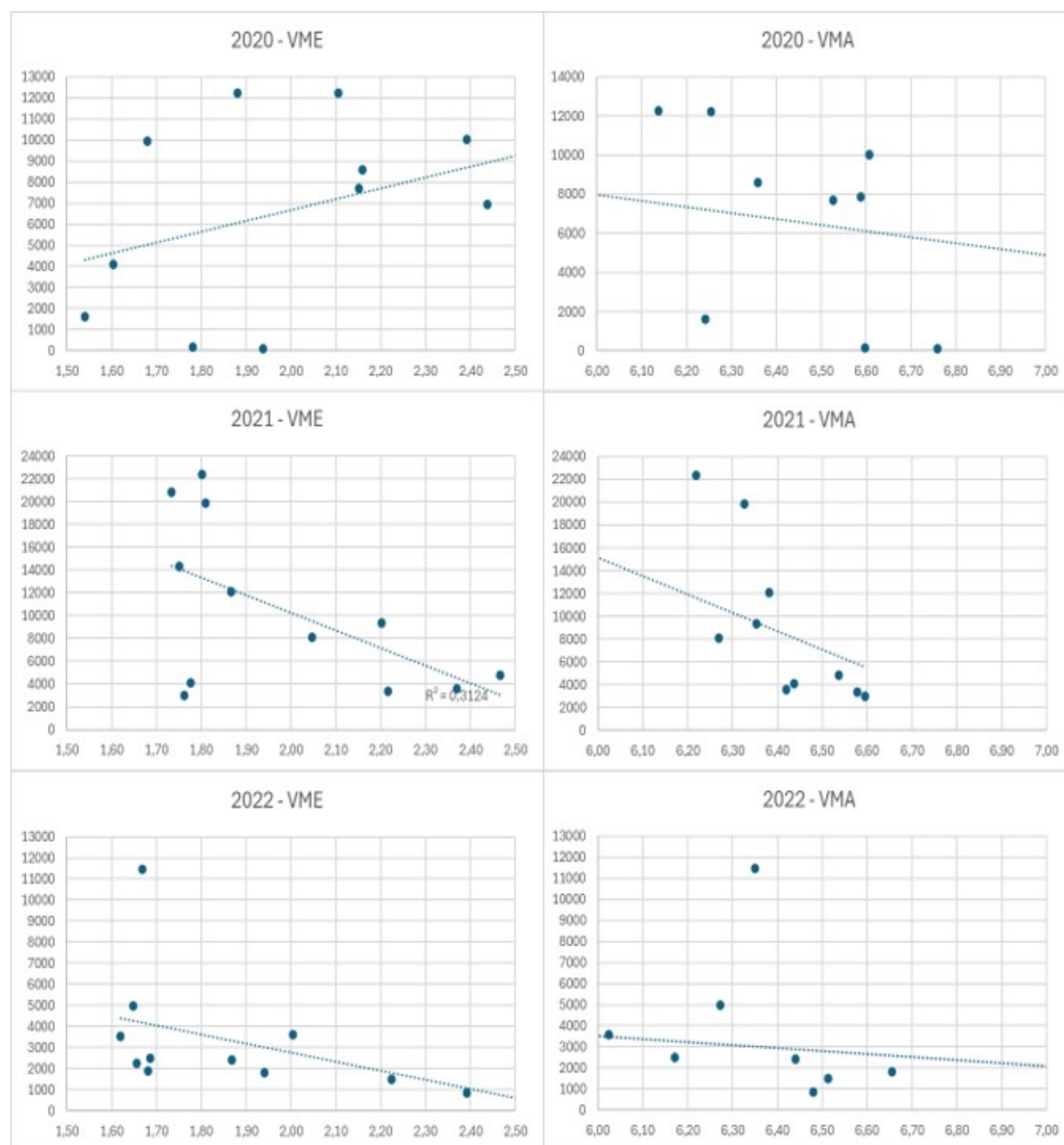


Fonte: Elaboração própria.

Os diagramas de dispersão apresentados na **Figura 2** evidenciaram concentração de maiores números de casos de SRAG em faixas inferiores de velocidade do vento. Observou-se redução dos valores de SRAG à medida que aumentavam os valores de velocidade média do vento (VME) e velocidade máxima do vento (VMA). A distribuição dos pontos apresentou padrão não linear entre as variáveis analisadas.

Figura 2. Diagramas de dispersão entre os casos mensais de SRAG e as velocidades média (VME) e máxima (VMA) do vento no Semiárido

brasileiro, apresentados separadamente para os anos de 2020, 2021 e 2022.



Fonte: Elaboração própria.

3.3. Correlação de Spearman Entre Ventilação e SRAG

A análise de correlação não paramétrica de Spearman (**Tabela 4**) confirmou as variações temporais na força e direção da associação entre a ventilação e a incidência de SRAG.

Tabela 4. Resultados da análise de correlação de Spearman (ρ) entre as variáveis de ventilação atmosférica - velocidade média do vento (VME) e velocidade máxima do vento (VMA) - e os casos de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022.

Variável	Ano	ρ (Spearman)	p-valor	Direção	Força
VME	2020	0,29	0,37	Positiva	Fraca
VMA	2020	-0,36	0,25	Negativa	Fraca
VME	2021	-0,41	0,18	Negativa	Fraca
VMA	2021	-0,88	<0,001	Negativa	Forte
VME	2022	-0,71	0,01	Negativa	Forte

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/ventilacao-atmosferica-e-ocorrencia-de-sindromes-respiratorias-agudas-graves-srag-no-semiarido-brasileiro-evidencias-de-limiar-criticos-e-implicacoes-para-a-vigilancia-epidemiologica-2020-2022?noblockage>

Fonte: Elaboração própria.

Em 2020, as correlações entre as variáveis de ventilação atmosférica e os casos de SRAG foram fracas e não significativas. Em 2021, a velocidade máxima do vento (VMA) apresentou correlação negativa forte e estatisticamente significativa com os casos de SRAG ($\rho = -0,88$; $p < 0,001$). Em 2022, a velocidade média do vento (VME) apresentou correlação negativa forte e significativa ($\rho = -0,71$; $p = 0,01$), enquanto a VMA apresentou correlação negativa moderada ($\rho = -0,57$; $p = 0,05$). Na análise consolidada do triênio, a VMA manteve

correlação negativa estatisticamente significativa ($p = -0,46$; $p = 0,005$), enquanto a VME não apresentou significância estatística ($p = -0,28$; $p = 0,10$).

3.4. Regressões Lineares Simples

Os resultados dos modelos de regressão linear simples (**Tabela 5**) corroboram a hipótese de que a relação entre ventilação e SRAG não é adequadamente descrita por uma função linear contínua e homogênea.

Tabela 5. Resultados das regressões lineares simples entre os casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) e as velocidades média (VME) e máxima (VMA) do vento no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022.

Ano	Variável	R ² (%)	p-valor	Coefficiente (β)	Associação
2020	VME	16,36	0,1922	5144,77	Direta
2021	VME	31,24	0,0589	-15 412,96	Inversa
2022	VME	24,38	0,1028	-4 308,01	Inversa

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/ventilacao-atmosferica-e-ocorrencia-de-sindromes-respiratorias-agudas-graves-srag-no-semiarido-brasileiro-evidencias-de-limiar-criticos-e-implicacoes-para-a-vigilancia-epidemiologica-2020-2022?noblockage>

Fonte: Elaboração própria.

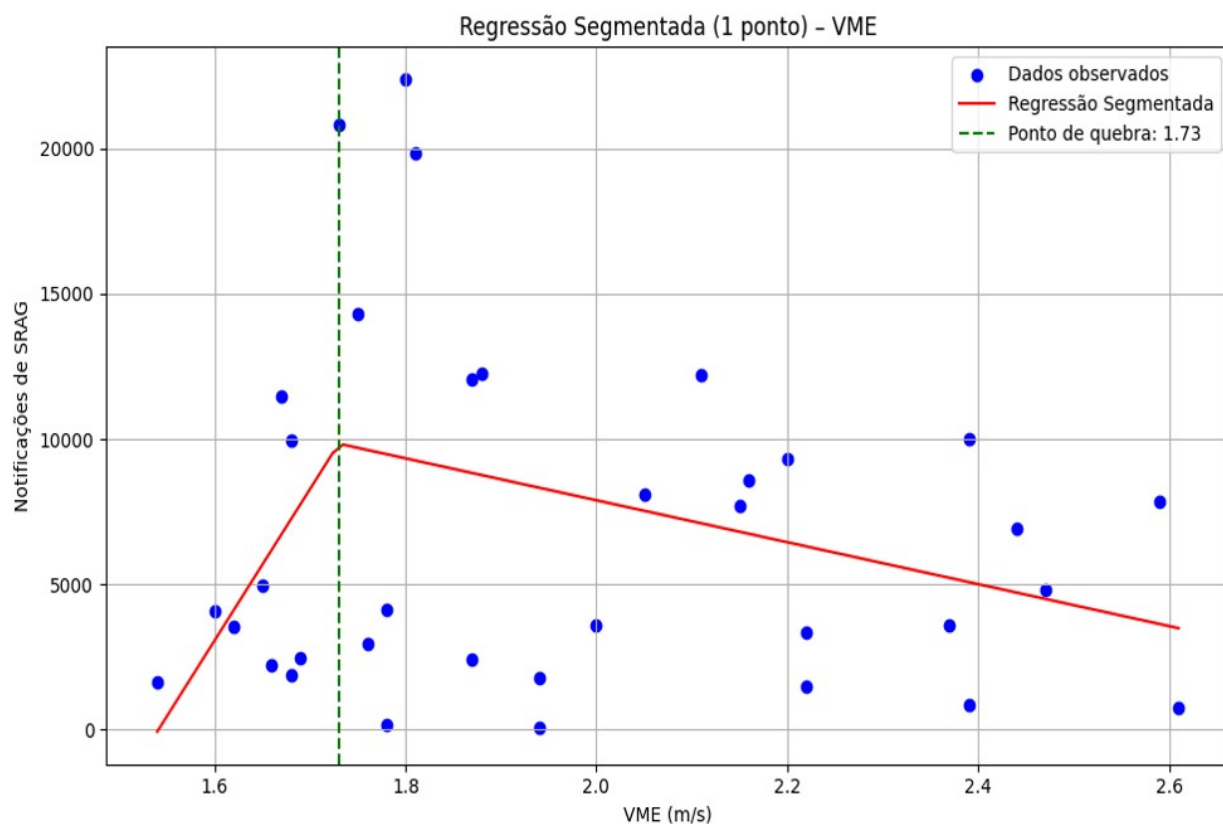
Apenas dois modelos lineares apresentaram associação estatisticamente significativa ao nível de 5%. O modelo referente à velocidade máxima do vento (VMA) em 2021 apresentou R^2 de 46,38% ($p = 0,0148$), enquanto o modelo consolidado do triênio para VMA apresentou R^2 de 10,99% ($p = 0,0482$). O modelo referente à velocidade média do vento (VME) no triênio não apresentou significância estatística ($p = 0,4896$), com R^2 de 1,41%.

3.5. Regressão Segmentada e Identificação de Limiares Críticos

A aplicação da regressão segmentada, tanto em sua abordagem frequentista (Muggeo, 2003) quanto bayesiana, revelou mudanças estruturais relevantes na relação entre a velocidade do vento e a incidência de SRAG no Semiárido brasileiro.

Nos modelos frequentistas, observou-se a presença de zonas críticas de transição para ambas as variáveis de ventilação atmosférica. Para a velocidade média do vento (VME), os modelos ajustados com um ponto de quebra identificaram limiar em aproximadamente 1,73 m/s, conforme apresentado na **Figura 3**.

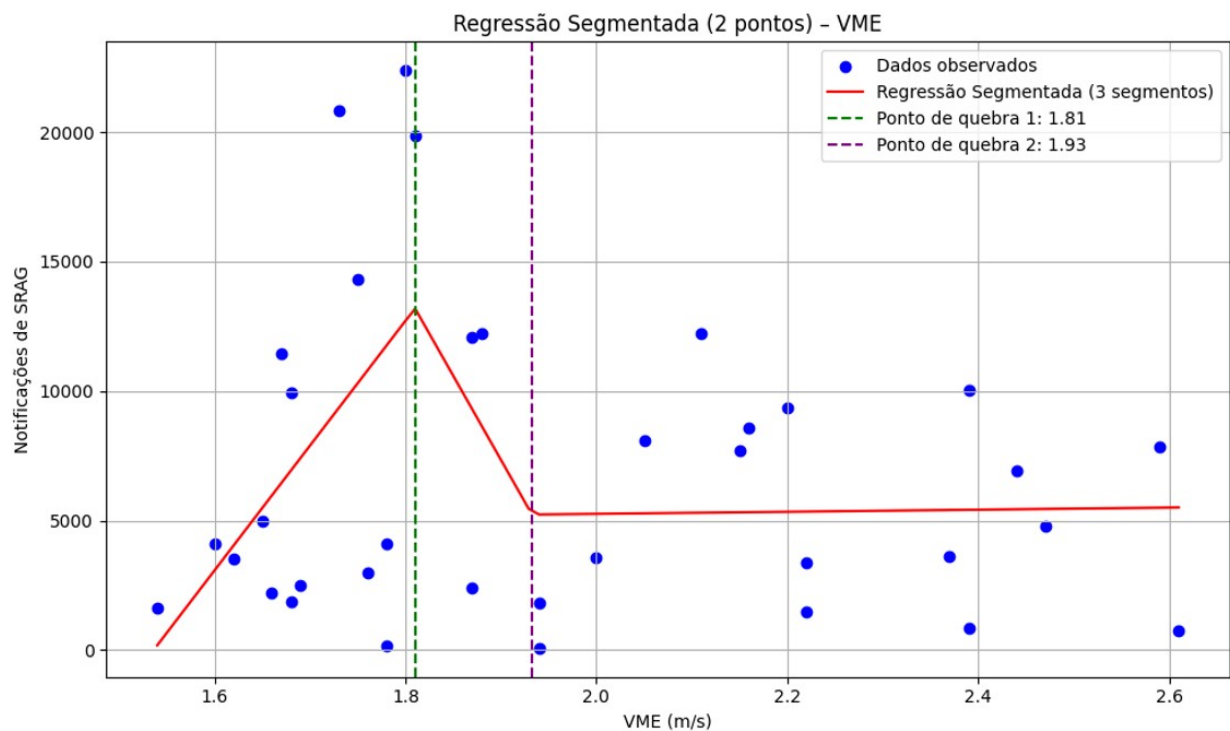
Figura 3. Regressão segmentada entre a velocidade média do vento (VME) e os casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022, com identificação de ponto de quebra estimado em 1,73 m/s.



Fonte: Elaboração própria.

A análise ajustada com dois pontos de quebra demonstrou uma zona de transição situada entre 1,81 m/s e 1,93 m/s, sugerindo alteração no comportamento da associação entre ventilação atmosférica e incidência de SRAG, como ilustrado na **Figura 4**.

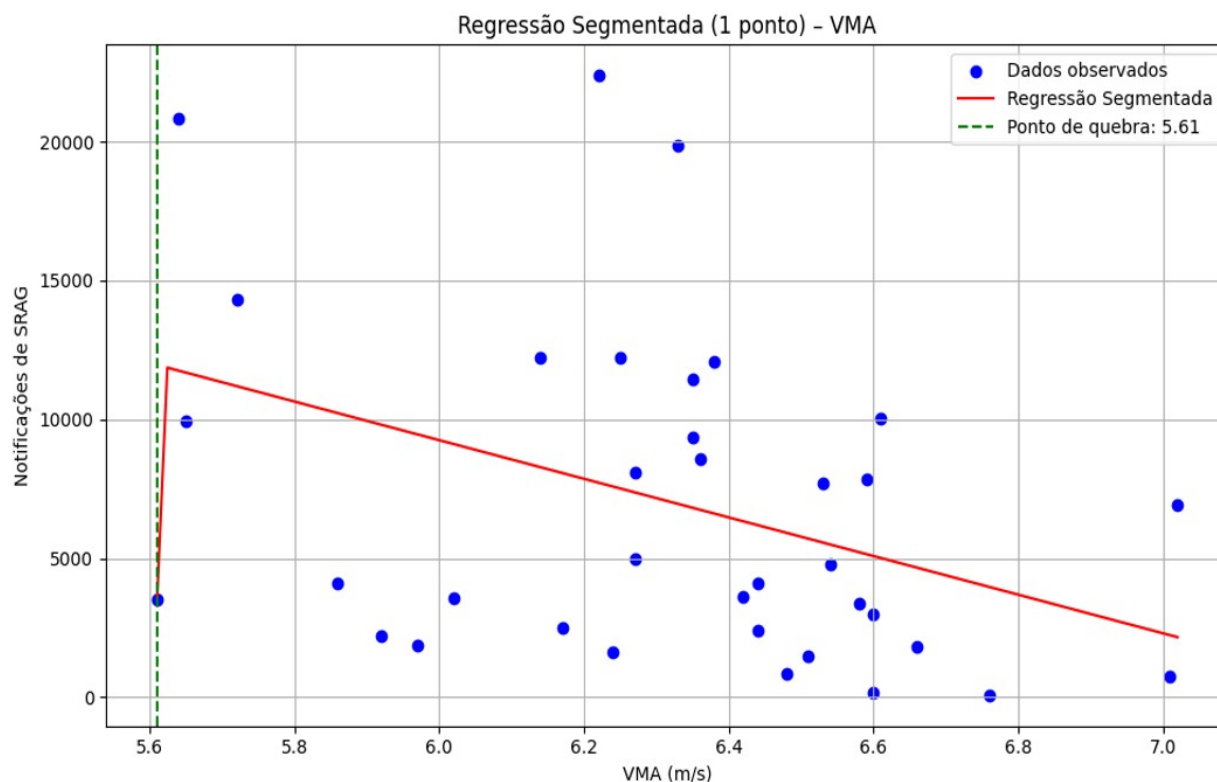
Figura 4. Regressão segmentada entre a velocidade média do vento (VME) e os casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022, ajustada com dois pontos de quebra estimados em 1,81 m/s e 1,93 m/s.



Fonte: Elaboração própria.

Para a velocidade máxima do vento (VMA), os modelos frequentistas identificaram pontos de quebra distribuídos entre 5,61 m/s e 6,22 m/s. O modelo ajustado com um ponto de inflexão está representado na **Figura 5**.

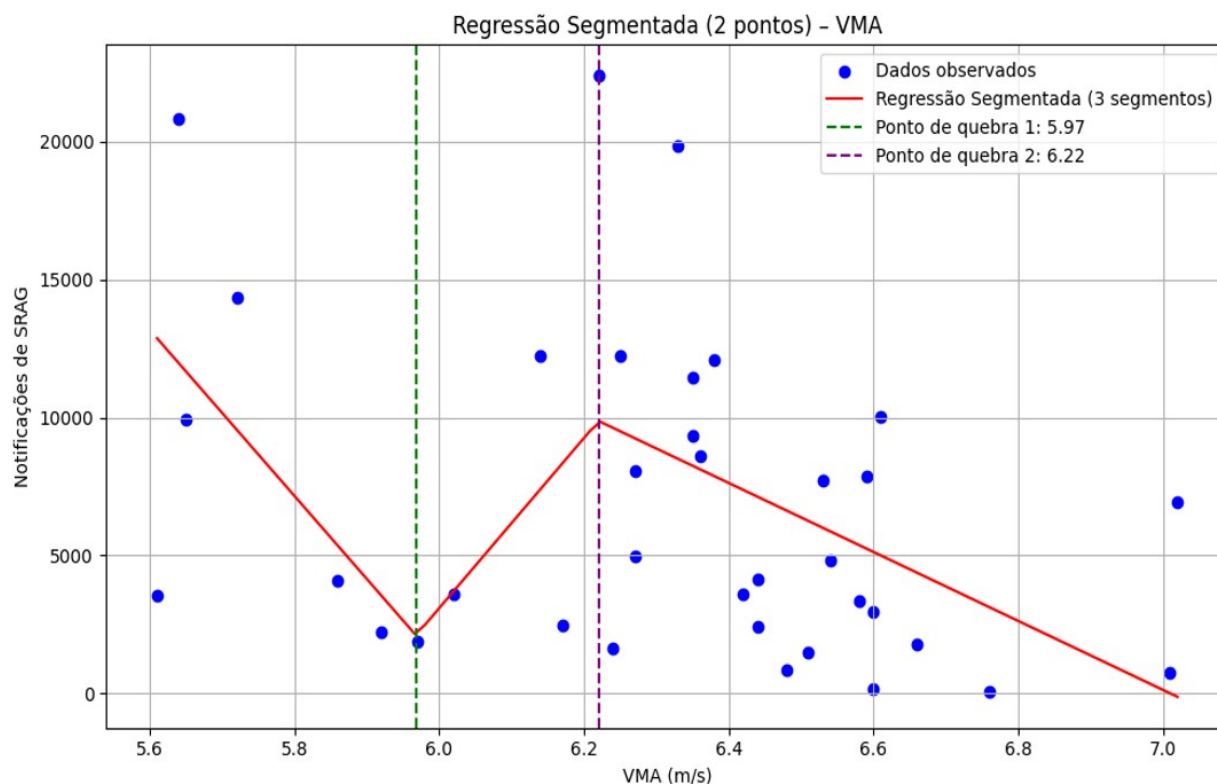
Figura 5. Regressão segmentada entre a velocidade máxima do vento (VMA) e os casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022, com identificação de ponto de quebra estimado em 5,61 m/s.



Fonte: Elaboração própria.

No modelo ajustado com dois pontos de quebra, os limiares foram estimados em 5,97 m/s e 6,22 m/s, reforçando a existência de uma faixa crítica de transição associada à dinâmica da ventilação atmosférica, conforme demonstrado na **Figura 6**.

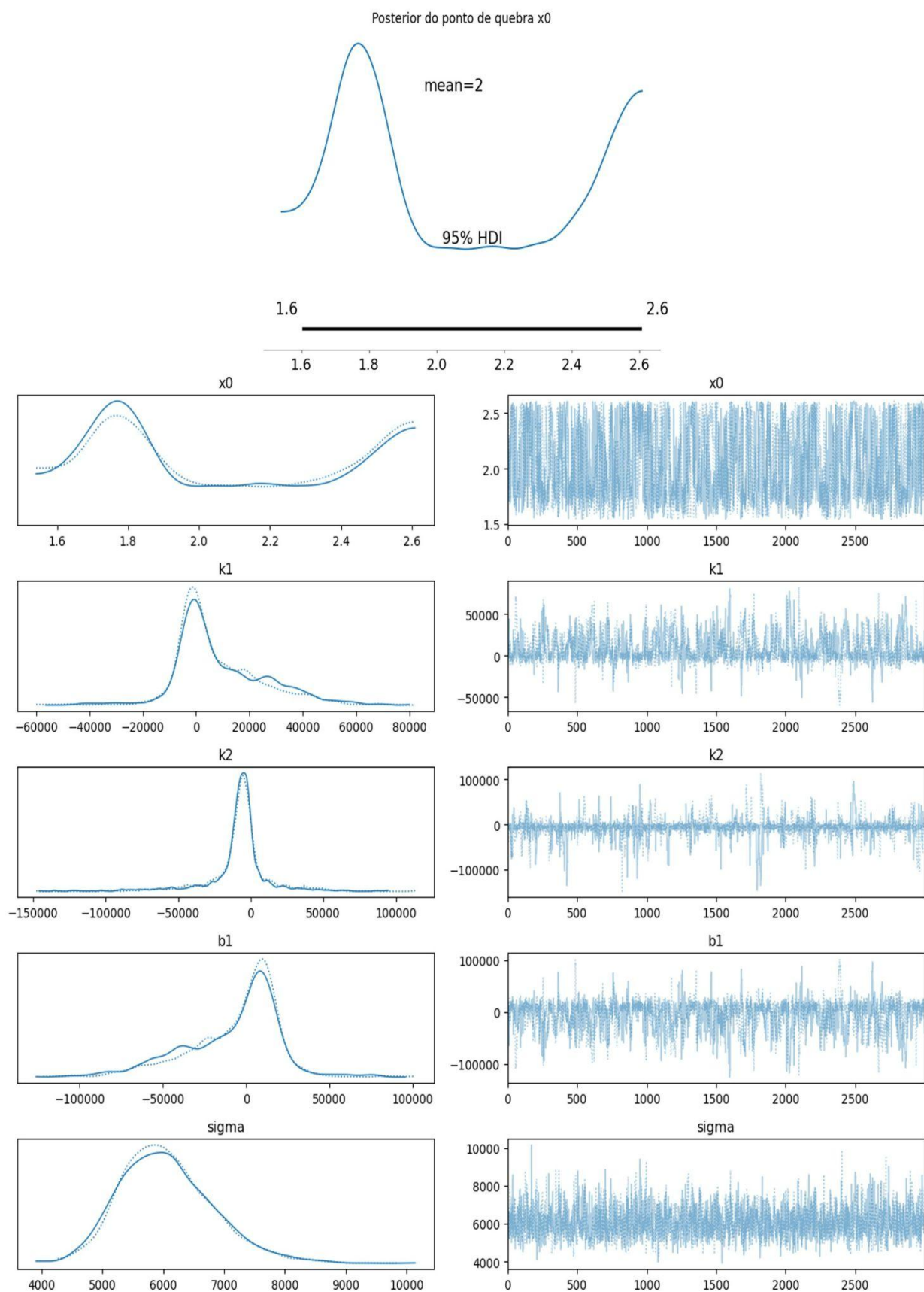
Figura 6. Regressão segmentada entre a velocidade máxima do vento (VMA) e os casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022, ajustada com dois pontos de quebra estimados em 5,97 m/s e 6,22 m/s.



Fonte: Elaboração própria.

A modelagem bayesiana permitiu aprofundar a análise ao incorporar a incerteza paramétrica e gerar distribuições posteriores completas para os pontos de quebra. Para a VME, o modelo bayesiano estimou um ponto de inflexão concentrado em torno de 2,0 m/s, apresentando intervalo de credibilidade de 95% entre 1,94 m/s e 2,05 m/s, como observado na **Figura 7**.

Figura 7. Regressão segmentada bayesiana aplicada à relação entre a velocidade média do vento (VME) e os casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022. A figura apresenta a distribuição posterior do ponto de quebra (x_0), os intervalos de credibilidade de 95% (HDI), as distribuições posteriores dos parâmetros do modelo e os gráficos de rastreamento (trace plots) obtidos por amostragem MCMC. O modelo estimou um limiar crítico em aproximadamente 2,0 m/s, com intervalo de credibilidade de 95% variando entre 1,94 m/s e 2,05 m/s.

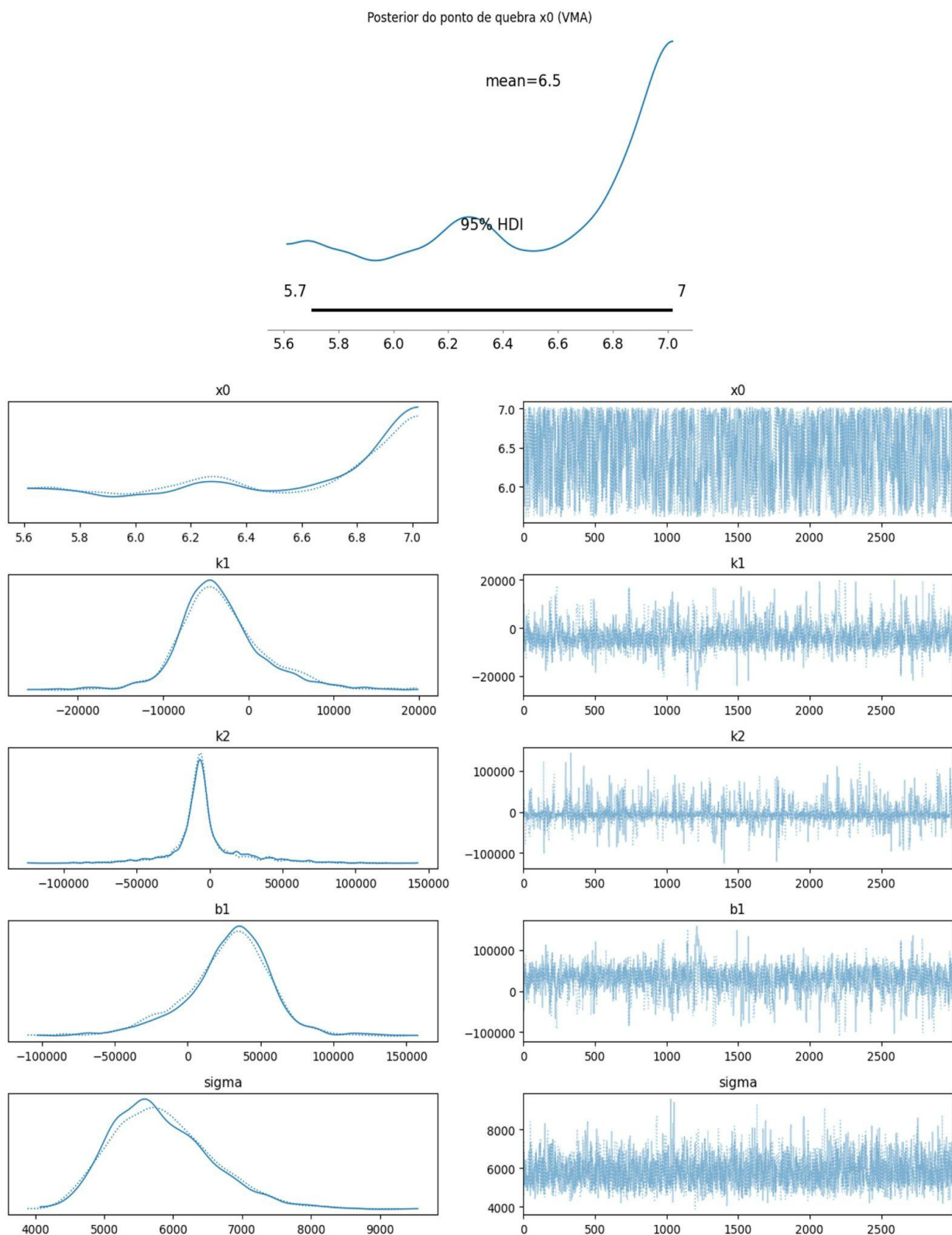


Fonte: Elaboração própria.

Para a VMA, a análise bayesiana convergiu para um ponto de quebra centrado em aproximadamente 6,5 m/s, com intervalo de credibilidade de 95% variando aproximadamente entre 6,1 m/s e 6,9 m/s, demonstrando convergência com os resultados frequentistas. A

distribuição posterior desse limiar e os parâmetros do modelo encontram-se representados na **Figura 8**.

Figura 8. Distribuição a posteriori do ponto de quebra (x_0) estimado para a velocidade máxima do vento (VMA) na regressão segmentada bayesiana aplicada aos casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022. A figura apresenta a distribuição posterior do limiar crítico, os intervalos de credibilidade de 95% (HDI), as distribuições posteriores dos parâmetros do modelo e os gráficos de rastreamento (trace plots) obtidos por amostragem MCMC. O ponto de quebra estimado concentrou-se em torno de 6,5 m/s, com intervalo de credibilidade de 95% variando aproximadamente entre 6,1 m/s e 6,9 m/s.



Fonte: Elaboração própria.

3.6. Distribuição dos Casos de SRAG Segundo os Limiares Críticos

A adoção dos limiares operacionais de referência de VME = 2,0 m/s e VMA = 6,5 m/s como pontos de corte para uma análise operacional revelou um impacto substancial e diferenciado na carga da doença (**Tabela 6**).

Tabela 6. Distribuição dos casos mensais de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro entre 2020 e 2022 segundo faixas de velocidade média (VME) e velocidade máxima do vento (VMA), considerando os limiares operacionais de 2,0 m/s e 6,5 m/s.

Variável	Velocidade	Nº de Meses	Total de Casos	Média Mensal de Casos	Proporção (%)
VME	< 2,0 m/s	21	155.500	7.405	63,60%
VME	≥ 2,0 m/s	15	89.202	5.947	36,40%
VMA	< 6,5 m/s	24	196.775	8.199	80,40%
VMA	≥ 6,5 m/s	12	47.927	3.994	19,60%

△ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/ventilacao-atmosferica-e-ocorrencia-de-sindromes-respiratorias-agudas-graves-srag-no-semiarido-brasileiro-evidencias-de-limiar-criticos-e-implicacoes-para-a-vigilancia-epidemiologica-2020-2022?noblockage>

Fonte: Elaboração própria.

Os maiores totais e médias mensais de casos de SRAG foram observados nos meses com valores de VME inferiores a 2,0 m/s e VMA inferiores a 6,5 m/s. Nos meses com VME inferior a 2,0 m/s, registraram-se 155.500 casos (63,60% do total), com média mensal de 7.405 casos. Para a VMA, 196.775 casos (80,40% do total) ocorreram em meses com valores inferiores a 6,5 m/s, com média mensal de 8.199 casos.

4. DISCUSSÃO

Os resultados sugerem que a ventilação atmosférica pode representar um componente ambiental associado à dinâmica coletiva da SRAG e previamente subestimado na dinâmica de transmissão da Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no contexto singular do Semiárido brasileiro. A identificação de limiares operacionais críticos - situados em aproximadamente **2,0 m/s para a VME** e **6,5 m/s para a VMA** - representa uma contribuição original e com potencial translacional direto para o fortalecimento da vigilância em saúde pública na região.

Embora a literatura internacional reconheça que períodos de baixa ventilação atmosférica estão associados ao aumento da transmissão aérea de vírus respiratórios, especialmente em ambientes externos e semiabertos (Morawska; Cao, 2020), ainda são escassos estudos que quantifiquem limiares críticos capazes de delimitar mudanças no comportamento epidemiológico dessas doenças. Nesse sentido, os achados deste estudo avançam ao identificar pontos de inflexão bem definidos para a velocidade do vento, associados a variações significativas na incidência de SRAG em nível coletivo, sugerindo que a ventilação não atua apenas como um fator contínuo, mas como um modulador com efeitos diferenciados a partir de determinados níveis críticos.

A interpretação desses achados exige reconhecer que a transmissão respiratória em escala populacional constitui um fenômeno ecológico complexo, resultante da interação simultânea entre variáveis ambientais, mobilidade populacional, vulnerabilidade social, estrutura urbana, sazonalidade climática e níveis coletivos de imunidade. Nesse contexto, a ventilação atmosférica não atua isoladamente, mas como um componente contextual capaz de

modular condições coletivas de exposição e dispersão aérea em diferentes escalas territoriais.

Embora o estudo utilize a categoria sindrômica ampla da SRAG, reconhece-se que a dinâmica epidemiológica do período analisado foi fortemente influenciada pela pandemia de COVID-19, especialmente nos anos de 2020 e 2021.

4.1. Mecanismos Biofísicos Subjacentes à Associação Observada

A relação inversa e limiar-dependente entre a velocidade do vento e a incidência de SRAG encontra respaldo em princípios fundamentais da física de aerossóis e da dinâmica atmosférica. Em condições de **baixa ventilação ($VME < 2,0 \text{ m/s}$)**, a atmosfera próxima à superfície tende a apresentar estabilidade térmica e mecânica. A camada limite planetária torna-se mais rasa e a turbulência de origem mecânica ou convectiva é reduzida. Este estado de estagnação relativa implica uma **baixa taxa de renovação do ar** e uma **limitada capacidade de dispersão horizontal e vertical** de poluentes e partículas em suspensão, incluindo os aerossóis respiratórios carreadores de vírus (Morawska; Cao, 2020; Fennelly, 2020).

Entretanto, é importante destacar que os mecanismos físicos aqui discutidos não devem ser interpretados como comprovação causal direta da dispersão atmosférica potencialmente associada à dinâmica respiratória em nível individual. Seu papel, neste estudo, consiste em fornecer coerência biofísica aos padrões ecológicos observados em nível coletivo e territorial.

Em regiões de baixa umidade, como o Semiárido, a evaporação acelerada das gotículas respiratórias favorece a formação dos chamados núcleos de gotícula (*droplet nuclei*), constituídos por

partículas de menor diâmetro, com maior estabilidade e tempo de residência prolongado na atmosfera (Morawska *et al.*, 2009; Vejerano; Marr, 2018). Em condições de vento fraco, essas partículas tendem a permanecer confinadas em volumes de ar relativamente restritos, reduzindo a taxa de dispersão e potencialmente compatível com maior permanência local de partículas (Fennelly, 2020).

Nestas condições, os aerossóis infecciosos exalados por indivíduos infectados - especialmente os núcleos de gotículas com diâmetro inferior a 5 μm , que evaporam rapidamente na atmosfera seca do Semiárido e podem permanecer viáveis por horas - tendem a se acumular e a formar "nuvens" concentradas em microambientes onde há aglomeração de pessoas (filas, feiras livres, transportes públicos abertos, residências com pouca ventilação natural). Consequentemente, torna-se compatível com maior potencial coletivo de exposição a aerossóis respiratórios (Morawska *et al.*, 2009; Shaman; Kohn, 2009).

Os achados observados são consistentes com a hipótese de que condições atmosféricas distintas possam influenciar a dinâmica coletiva de exposição a aerossóis respiratórios.

Por outro lado, quando a velocidade do vento ultrapassa o limiar crítico ($VME \geq 2,0 \text{ m/s}$), a turbulência mecânica aumenta. Isso promove uma mistura mais eficiente da camada de ar junto ao solo com as camadas superiores da atmosfera, acelerando a diluição da concentração de aerossóis e sua remoção física do espaço respirável dos indivíduos. Ventos mais fortes também podem interagir com outras variáveis ambientais, como a radiação solar e a temperatura, afetando a viabilidade dos vírus em suspensão (Şahin, 2020; Bashir *et al.*, 2020). A identificação de um limiar mais elevado para a VMA

(6,5 m/s) e seu efeito proporcionalmente maior (redução de >50% nos casos) sugere que os eventos de pico de vento (rajadas e períodos de maior turbulência) podem favorecer maior dispersão e renovação atmosférica, reduzindo a concentração ambiental de partículas respiratórias acumuladas em períodos de baixa circulação do ar.

A magnitude da diferença observada entre os cenários atmosféricos reforça a relevância epidemiológica desse comportamento. Nos meses em que a VMA permaneceu abaixo de 6,5 m/s, observou-se média mensal de 8.199 casos de SRAG, enquanto os períodos acima desse limiar apresentaram média de 3.994 casos, correspondendo a uma redução relativa superior a 50%. Esse contraste sugere que alterações relativamente discretas na dinâmica atmosférica regional podem estar associadas a mudanças expressivas na carga populacional da doença.

Um dos achados mais relevantes deste estudo foi a diferença consistente observada entre o comportamento epidemiológico da velocidade média do vento (VME) e da velocidade máxima do vento (VMA). Embora ambas tenham apresentado associação inversa com a ocorrência de SRAG, a VMA demonstrou maior estabilidade analítica, maior força de correlação e maior impacto operacional na estratificação dos casos.

Essa diferença tornou-se particularmente evidente nas análises de correlação e regressão linear realizadas ao longo do triênio. A VMA apresentou os coeficientes mais intensos e os modelos estatisticamente mais estáveis, destacando-se especialmente em 2021, quando atingiu correlação negativa forte ($\rho = -0,88$) e o maior poder explicativo observado entre os modelos lineares avaliados (R^2

= 46,38%). Além disso, a estratificação operacional por limiares demonstrou maior contraste epidemiológico para a VMA, concentrando mais de 80% dos casos nos meses abaixo de 6,5 m/s.

Sob perspectiva atmosférica, a velocidade máxima do vento pode ser interpretada como uma proxy indireta da intensidade de turbulência mecânica disponível para renovação e mistura do ar próximo à superfície. Isso pode explicar, ao menos parcialmente, a maior estabilidade analítica observada para a VMA em comparação à velocidade média do vento.

Os limiares identificados neste estudo sugerem a existência de transições entre regimes atmosféricos distintos no Semiárido. Em velocidades inferiores a 2,0 m/s (VME) e 6,5 m/s (VMA), o sistema tende a operar em um regime de baixa mistura, no qual pequenas variações na ventilação podem produzir diferenças relevantes na concentração local de aerossóis. Acima desses valores, observa-se a transição para um regime de maior turbulência e renovação do ar, no qual a eficiência de dispersão se torna mais elevada e possivelmente não linear.

Essa interpretação sugere que os limiares identificados não representam apenas pontos estatísticos de inflexão, mas podem refletir mudanças estruturais no comportamento físico da atmosfera, com implicações diretas para a dinâmica em nível coletivo. Sob essa perspectiva, os limiares identificados podem ser interpretados como marcadores de transição entre diferentes regimes atmosféricos de dispersão. A dinâmica observada sugere que a resposta epidemiológica à ventilação atmosférica não ocorre de forma linear, mas por transições entre estados ambientais distintos, nos quais pequenas alterações na circulação do ar podem

produzir mudanças desproporcionais na exposição coletiva a aerossóis respiratórios. Abaixo desses valores, predominariam condições de maior estabilidade e menor renovação do ar próximo à superfície, enquanto acima dos limiares ocorreria aumento mais eficiente da mistura atmosférica e da dispersão de partículas inaláveis.

Os resultados também sugerem que os efeitos da ventilação atmosférica sobre a dinâmica da SRAG podem operar em múltiplas escalas simultaneamente. Em nível microlocal, pequenas variações na circulação do ar podem influenciar a permanência de aerossóis em ambientes urbanos específicos. Em escala regional, padrões persistentes de baixa ventilação podem alterar a capacidade geral de dispersão atmosférica sobre grandes áreas populacionais. Essa característica multiescalar reforça a complexidade ecológica do fenômeno e dificulta interpretações lineares simplificadas da relação entre clima e transmissão respiratória.

Tal interpretação é compatível com princípios da dinâmica de fluidos e da física de aerossóis, segundo os quais processos turbulentos aumentam significativamente a mistura vertical e horizontal do ar, reduzindo a permanência local de partículas em suspensão (Morawska; Cao, 2020; Fennelly, 2020). Os resultados observados sugerem, portanto, que variáveis associadas à intensidade máxima da ventilação podem possuir maior sensibilidade epidemiológica em estudos ecológicos sobre transmissão aérea.

Embora os mecanismos biofísicos descritos na literatura forneçam plausibilidade teórica para os padrões observados, os resultados deste estudo devem ser interpretados dentro dos limites inerentes

ao delineamento ecológico adotado. Dessa forma, as associações identificadas não permitem inferir relações causais diretas entre ventilação atmosférica e transmissão individual de SRAG, mas indicam padrões populacionais compatíveis com hipóteses de influência ambiental em escala territorial.

4.2. Variabilidade Interanual e o Papel de Fatores Contextuais

A análise estratificada por ano revelou a importância crucial de se considerar o contexto epidemiológico e imunológico da população ao interpretar o efeito das variáveis ambientais. A forte correlação e o alto poder explicativo do modelo linear para VMA em 2021 ($p = -0,88$; $R^2 = 46,4\%$) coincidiram com um período de alta suscetibilidade populacional (baixa cobertura vacinal) e alta transmissibilidade do patógeno (circulação de variantes como Gamma e Delta do SARS-CoV-2). Neste cenário de elevada pressão epidemiológica, a ventilação atmosférica parece ter atuado como um fator limitante crítico, no qual pequenas variações na capacidade de dispersão do ambiente resultaram em oscilações expressivas na carga de doença observada. Esse comportamento sugere que, em períodos de intensa circulação viral, os efeitos ambientais associados à dispersão atmosférica tendem a tornar-se mais detectáveis em escala ecológica.

Adicionalmente, a literatura de micrometeorologia indica que, em condições de vento muito baixo, podem se formar bolsões de estagnação em escala local, especialmente em áreas urbanas com geometrias complexas (Britter; Hanna, 2003). Esses microambientes funcionam como volumes de ar parcialmente confinados, nos quais a renovação atmosférica é limitada, favorecendo o acúmulo de poluentes e partículas em suspensão (Vardoulakis *et al.*, 2003). A

presença desses microambientes pode amplificar a exposição a aerossóis potencialmente infecciosos em escala local, inclusive em espaços abertos ou semiabertos, uma vez que a circulação do ar é reduzida e a dispersão ocorre de forma limitada (Oke, 1988). Essa dinâmica sugere que, mesmo sob condições regionais similares de ventilação, variações locais na estrutura urbana e no uso do espaço podem modular a intensidade da exposição populacional.

Em contrapartida, no ano de 2022, a despeito da manutenção de condições de baixa ventilação, o número absoluto de casos despencou. Este declínio é, muito provavelmente, atribuível à modificação da vulnerabilidade populacional de base, impulsionada pela ampla cobertura vacinal contra COVID-19 e pela imunidade híbrida adquirida por infecção natural. Este achado demonstra que a ventilação não é um determinante absoluto, mas sim um modulador cujo efeito é condicionado pelo nível de imunidade coletiva e por outros fatores biológicos e sociais. Em um cenário de alta imunidade, o "ruído" ambiental pode ser menos perceptível ou ter seu efeito sobrepujado pela proteção conferida pela vacina. Este resultado está alinhado com a compreensão de que a transmissão de doenças infecciosas é um fenômeno complexo, resultante da interação dinâmica entre agente, hospedeiro e ambiente (triade ecológica) (Breilh, 2006).

Os resultados observados sugerem que a ventilação atmosférica pode atuar como um componente adicional de vulnerabilidade socioambiental em regiões estruturalmente fragilizadas. No Semiárido brasileiro, períodos de baixa circulação atmosférica ocorrem em contextos frequentemente marcados por limitações de infraestrutura urbana, elevada densidade domiciliar, ventilação

intradomiciliar precária e desigualdade de acesso aos serviços de saúde.

Nesse cenário, condições atmosféricas desfavoráveis podem potencializar exposições coletivas já influenciadas por vulnerabilidades sociais historicamente acumuladas, reforçando a necessidade de abordagens integradas entre epidemiologia ambiental, vigilância territorial e determinação social da saúde (Buss; Pellegrini Filho, 2007; Barcellos *et al.*, 2009).

Além dos mecanismos atmosféricos propriamente ditos, os achados também devem ser interpretados à luz da determinação territorial da saúde. No Semiárido brasileiro, condições de vulnerabilidade social, infraestrutura sanitária limitada, aglomeração domiciliar, desigualdade de acesso aos serviços de saúde e fragilidade logística podem potencializar os efeitos ambientais observados, produzindo cenários epidemiológicos mais sensíveis às variações climáticas regionais (Buss; Pellegrini Filho, 2007; Barcellos *et al.*, 2009; Marengo *et al.*, 2017). Nesse contexto, fatores climáticos não atuam isoladamente, mas interagem com desigualdades históricas e condicionantes territoriais que influenciam a distribuição coletiva dos riscos sanitários.

4.3. Convergência Metodológica e a Robusta Evidência para Limiares Não Lineares

A utilização de duas abordagens estatísticas distintas e complementares para a regressão segmentada - a frequentista e a bayesiana (Muggeo, 2003; Gelman *et al.*, 2013; Salvatier; Wiecki; Fonnesbeck, 2016) - representa um dos principais pontos fortes deste estudo. A convergência dos resultados obtidos por ambos os

métodos em torno de limiares semelhantes ($\approx 2,0$ m/s para VME e $\approx 6,5$ m/s para VMA) confere robustez analítica aos achados e reduz a probabilidade de que os pontos de quebra identificados sejam meros artefatos específicos de modelagem.

A abordagem bayesiana, em particular, apresentou vantagens importantes ao permitir a incorporação explícita da incerteza associada às estimativas dos pontos de inflexão por meio de distribuições posteriores e intervalos de credibilidade (HDI 95%). Para a VME, observou-se um intervalo relativamente estreito (1,94–2,05 m/s), sugerindo elevada estabilidade da estimativa mesmo diante da variabilidade inerente aos fenômenos ambientais e epidemiológicos analisados. Essa precisão fortalece o potencial de operacionalização dos limiares identificados em estratégias de vigilância epidemiológica territorial.

A convergência entre diferentes paradigmas inferenciais fortalece ainda a consistência ecológica dos resultados, especialmente em sistemas ambientais complexos marcados por elevada variabilidade natural. Nesse contexto, a compatibilidade entre abordagens frequentistas e bayesianas pode ser interpretada como um importante indicador de estabilidade analítica e plausibilidade epidemiológica.

A superioridade da regressão segmentada em relação aos modelos lineares simples - que apresentaram baixo poder explicativo e, na maioria dos casos, ausência de significância estatística - reforça a noção de que a relação entre ventilação atmosférica e SRAG não se comporta de maneira linear e homogênea ao longo de toda a faixa de exposição analisada. Em vez de indicar ausência de associação, a limitada capacidade explicativa dos modelos lineares sugere que o

fenômeno analisado é marcado por mudanças estruturais de comportamento, mais compatíveis com relações limiar-dependentes do que com respostas contínuas e proporcionais.

Nos modelos lineares simples, apenas duas análises apresentaram significância estatística ao nível de 5%, ambas relacionadas à VMA. Em contraste, a regressão segmentada identificou padrões consistentes de inflexão para ambas as variáveis de ventilação, sugerindo que a relação entre vento e SRAG se concentra em faixas atmosféricas específicas, e não em respostas proporcionais contínuas ao longo de toda a distribuição dos dados.

A identificação de limiares relativamente estáveis por meio da regressão segmentada indica que o sistema epidemiológico responde de forma distinta em diferentes regimes atmosféricos. Isso significa que pequenas variações na ventilação abaixo dos limiares críticos podem produzir efeitos epidemiológicos mais relevantes do que variações equivalentes acima desses pontos. Dessa forma, a utilização exclusiva de modelos lineares simples poderia induzir à interpretação equivocada de ausência de efeito, quando, na realidade, o comportamento observado parece concentrar-se em faixas específicas de ventilação atmosférica.

Tal comportamento é compatível com sistemas ambientais complexos, nos quais transições abruptas e mudanças estruturais de regime frequentemente substituem relações lineares homogêneas (Susser, 1994; Pearce, 2000; Gelman *et al.*, 2013).

Nesse sentido, os resultados aqui apresentados devem ser interpretados dentro do caráter exploratório e ecológico do estudo, cujo objetivo central consiste na identificação de padrões

populacionais compatíveis com hipóteses de modulação ambiental da transmissão respiratória, e não na demonstração de relações causais individuais.

4.4. Implicações para a Vigilância Epidemiológica e a Regionalização de Políticas Públicas

Os resultados deste estudo têm implicações práticas significativas e oferecem uma base para o desenvolvimento de ferramentas de vigilância ambiental de baixo custo e alta aplicabilidade no Semiárido.

Outro aspecto relevante dos resultados refere-se ao elevado potencial operacional das variáveis utilizadas. Diferentemente de indicadores epidemiológicos dependentes de consolidação laboratorial ou notificação clínica tardia, os dados meteorológicos utilizados neste estudo são públicos, contínuos, automatizados e disponíveis em tempo quase real por meio da rede do INMET. Essa característica amplia significativamente a viabilidade de incorporação da ventilação atmosférica em sistemas complementares de alerta epidemiológico territorial.

Mais do que uma associação climática inespecífica, os resultados sugerem a existência de uma possível “janela atmosférica crítica” para a transmissão populacional de SRAG no Semiárido brasileiro, caracterizada por condições persistentes de baixa ventilação atmosférica. A identificação dessa faixa operacional amplia o potencial de utilização de variáveis meteorológicas públicas como ferramentas complementares de vigilância epidemiológica territorial.

Os achados do presente estudo dialogam com uma perspectiva emergente de epidemiologia ambiental operacional, na qual variáveis climáticas deixam de ser interpretadas apenas como fatores contextuais e passam a integrar estratégias ativas de monitoramento territorial e antecipação de risco em saúde pública.

A partir dos limiares identificados, torna-se possível discutir potenciais aplicações operacionais da ventilação atmosférica em estratégias territoriais de vigilância epidemiológica no Semiárido brasileiro.

1. **Indicador de Alerta Precoce:** A VME e a VMA podem ser facilmente monitoradas em tempo quase real por meio dos dados públicos das estações meteorológicas do INMET. Gestores estaduais e municipais de saúde poderiam estabelecer um sistema de **alerta de "estagnação atmosférica" ou "calmaria de risco"** sempre que as previsões meteorológicas indicarem a persistência de ventos médios abaixo de 2,0 m/s e máximas abaixo de 6,5 m/s por um determinado número de dias consecutivos, especialmente durante o outono (março a maio), que é o período crítico identificado.

2. **Otimização de Recursos e Ações de Prevenção:** Durante os períodos de alerta, ações de saúde pública poderiam ser intensificadas de forma proativa. Isso incluiria: (a) **reforço na comunicação de risco**, orientando a população sobre a importância da ventilação natural de ambientes internos (abrir janelas e portas para criar correntes de ar), mesmo em dias de pouco vento externo, e sobre o uso de máscaras faciais de boa vedação em locais com aglomeração; (b) **alocação estratégica**

de insumos e pessoal, preparando as unidades de saúde para um possível aumento na demanda por atendimento de síndromes gripais e SRAG.

3. Regionalização do Calendário Vacinal: Este é um dos desdobramentos mais promissores. O calendário nacional de vacinação contra a Influenza, por exemplo, é baseado em critérios de sazonalidade viral do Sul-Sudeste. Os dados aqui apresentados sugerem que o período de maior risco de transmissão de SRAG no Semiárido (março--maio) (Brasil, 2022) precede ligeiramente o pico da campanha nacional (abril--maio). Propõe-se, como uma **hipótese a ser testada em estudos de efetividade e modelagem matemática**, a antecipação do início da campanha de vacinação contra Influenza e a implementação de reforços de vacinas contra COVID-19 no Semiárido para os meses de **fevereiro e março**. O objetivo seria garantir que a proteção vacinal da população esteja em seu pico máximo exatamente no início da janela de maior vulnerabilidade ambiental. Tal medida tem o potencial de aumentar a efetividade das campanhas e salvar vidas, otimizando o uso dos recursos públicos de saúde em uma região com necessidades específicas.

Os limiares identificados neste estudo não devem ser interpretados como fronteiras rígidas ou universais da transmissão respiratória, mas como referências ecológicas operacionais compatíveis com mudanças estruturais no comportamento atmosférico regional. Sua relevância reside menos na definição de valores absolutos fixos e mais na capacidade de sinalizar transições entre contextos ambientais potencialmente mais ou menos favoráveis à permanência coletiva de aerossóis em suspensão.

4.5. Limitações do Estudo e Caminhos para Pesquisas Futuras

É fundamental reconhecer as limitações inerentes ao presente estudo, muitas das quais decorrem do próprio delineamento ecológico adotado. A natureza agregada das análises impede inferências causais em nível individual, de modo que os resultados observados devem ser interpretados como associações ecológicas compatíveis com hipóteses de modulação ambiental da dinâmica coletiva da SRAG. Além disso, a utilização de bases secundárias de vigilância epidemiológica, especialmente do SIVEP-Gripe, pode estar sujeita a limitações relacionadas à completude, heterogeneidade de preenchimento e possíveis subnotificações.

A agregação mensal das variáveis analisadas também pode ter suavizado extremos meteorológicos e epidemiológicos, reduzindo parcialmente a sensibilidade temporal das associações identificadas. Embora a série temporal utilizada tenha sido composta por 36 observações mensais agregadas, cada unidade temporal representa a consolidação ecológica de milhares de notificações epidemiológicas distribuídas territorialmente e integradas a dados meteorológicos provenientes de múltiplas estações do INMET. Dessa forma, a densidade informacional do painel analisado ultrapassa a interpretação simplificada do número absoluto de observações temporais.

Outro aspecto relevante refere-se à ausência de variáveis potencialmente confundidoras que poderiam influenciar simultaneamente a dinâmica da SRAG e as condições ambientais, como níveis de poluição atmosférica, mobilidade populacional, densidade urbana, cobertura vacinal local e adesão a medidas não farmacológicas. Assim, os resultados aqui apresentados não devem

ser interpretados como demonstração causal direta da transmissão viral mediada pelo vento, mas como evidências ecológicas consistentes compatíveis com hipóteses de modulação atmosférica da dinâmica coletiva da SRAG em contextos territoriais específicos.

Embora os limiares identificados sejam específicos ao contexto climático e territorial do Semiárido brasileiro, a lógica ecológica subjacente à associação entre ventilação atmosférica e transmissão respiratória pode possuir aplicabilidade mais ampla em outros contextos climáticos caracterizados por baixa renovação atmosférica. Dessa forma, os resultados aqui apresentados não devem ser interpretados como valores universais fixos, mas como evidências contextualmente dependentes de modulação ambiental da transmissão aérea.

Estudos futuros podem ampliar os achados deste trabalho por meio da utilização de séries temporais com maior resolução diária ou semanal, permitindo a aplicação de modelos de defasagem distribuída não linear (DLNM) (Gasparrini, 2011) para investigação de efeitos acumulados e estruturas temporais de resposta. Da mesma forma, abordagens espaciais explícitas, utilizando técnicas de interpolação atmosférica e modelagem espaço-temporal, poderão contribuir para a identificação de áreas prioritárias de vulnerabilidade epidemiológica associadas à ventilação atmosférica.

Além disso, estudos com delineamento individual, como coortes prospectivas ou estudos caso-controle em comunidades sentinelas, podem auxiliar na validação dos padrões ecológicos aqui identificados, incorporando medidas mais detalhadas de exposição ambiental, características domiciliares de ventilação e fatores clínicos individuais.

Os resultados deste estudo também sugerem que a ventilação atmosférica pode representar uma variável ambiental relevante para modelos epidemiológicos de transmissão aérea. Modelos clássicos do tipo SIR e SEIR (Kermack; McKendrick, 1927; Keeling; Rohani, 2008) frequentemente incorporam parâmetros relacionados à temperatura, sazonalidade e umidade, enquanto a ventilação atmosférica tende a permanecer subexplorada ou tratada como variável secundária.

A identificação de limiares ecológicos associados à dinâmica da SRAG sugere que o vento pode atuar como um modulador não linear da transmissibilidade em determinados contextos atmosféricos, especialmente em condições persistentes de baixa renovação do ar. Embora os achados aqui apresentados não permitam inferência causal individual, eles levantam a hipótese de que a incorporação de parâmetros relacionados à ventilação atmosférica possa contribuir para representações mais realistas da dinâmica coletiva de transmissão respiratória em modelos epidemiológicos futuros.

Nesse sentido, os achados deste estudo devem ser interpretados como evidências ecológicas contextualmente situadas, úteis para ampliar a compreensão das interações entre clima, território e dinâmica epidemiológica em regiões ambientalmente vulneráveis.

5. CONCLUSÕES

Este estudo fornece evidências ecológicas consistentes compatíveis com a hipótese de que a ventilação atmosférica possa atuar como componente ambiental relevante na dinâmica populacional da Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) no Semiárido brasileiro.

Os resultados identificaram uma associação inversa e não linear entre a velocidade do vento e a carga populacional da doença, compatível com a hipótese de que diferentes condições de ventilação atmosférica estejam associadas a distintos padrões coletivos de transmissão respiratória.

A aplicação de modelos de regressão segmentada sob os paradigmas frequentista e bayesiano permitiu identificar limiares ecológicos funcionais de ventilação atmosférica, notadamente em torno de 2,0 m/s para a velocidade média do vento (VME) e 6,5 m/s para a velocidade máxima do vento (VMA). A convergência entre diferentes abordagens analíticas e a estabilidade das distribuições posteriores reforçam a consistência ecológica dos achados, embora os limiares identificados devam ser interpretados no contexto exploratório e territorial do estudo.

A análise estratificada por esses limiares mostrou, de forma consistente, que 63,6% dos casos de SRAG no triênio ocorreram em meses com VME inferior a 2,0 m/s, enquanto 80,4% ocorreram em meses com VMA inferior a 6,5 m/s. A superação desses limiares correspondeu a menores médias mensais de casos, aproximadamente 19,7% para VME e 51,3% para VMA. Esses achados sustentam a interpretação de que a ventilação atmosférica atua como fator limiar-dependente, sendo as condições de baixa circulação atmosférica compatíveis com maior permanência ambiental de aerossóis respiratórios em escala coletiva, enquanto ventos mais intensos são compatíveis com maior dispersão e renovação atmosférica.

Embora o efeito da ventilação seja modulado pelo contexto epidemiológico mais amplo, como evidenciado pela variação na

força da associação entre 2021 e 2022 (período de mudança na imunidade populacional), os limiares identificados mantiveram-se como marcadores consistentes de períodos de maior vulnerabilidade ambiental. Do ponto de vista aplicado, os resultados deste estudo sugerem que a ventilação atmosférica possui potencial significativo para ser operacionalizada como um indicador ambiental de baixo custo e alta escalabilidade nos sistemas de vigilância epidemiológica do Semiárido. A utilização exclusiva de bases públicas nacionais amplia significativamente o potencial de replicabilidade e escalabilidade da metodologia proposta, favorecendo sua incorporação por serviços regionais de vigilância epidemiológica sem necessidade de infraestrutura tecnológica complexa ou aquisição de dados privados especializados. Sua incorporação em sistemas de alerta precoce pode contribuir para a antecipação de períodos de maior risco, otimizando o planejamento e a alocação de recursos em saúde pública.

Nesse contexto, os achados reforçam que a influência da ventilação atmosférica depende da interação dinâmica entre condições ambientais, susceptibilidade populacional e contexto epidemiológico vigente, reforçando o caráter multifatorial e contextual da transmissão respiratória em escala populacional.

Os achados também sugerem a existência de uma possível janela atmosférica crítica para maior vulnerabilidade epidemiológica à SRAG no Semiárido brasileiro, caracterizada pela persistência de condições de baixa ventilação atmosférica. A operacionalização dessa faixa ambiental pode representar uma estratégia complementar para antecipação de períodos de maior risco coletivo em contextos territorialmente vulneráveis.

Este estudo contribui para o avanço da epidemiologia ambiental ao demonstrar que variáveis climáticas podem possuir potencial utilidade complementar em estratégias territoriais de vigilância epidemiológica. Ao identificar limiares críticos e caracterizar seus efeitos não lineares, ampliamos as possibilidades de uma integração mais profunda e sinérgica entre a climatologia, a geografia da saúde e a prática da vigilância epidemiológica. Em regiões marcadas por profundas desigualdades e vulnerabilidades climáticas, como o Semiárido brasileiro, a utilização inteligente de dados ambientais públicos representa uma estratégia promissora e necessária para fortalecer a resiliência dos sistemas de saúde e promover a equidade na proteção da saúde da população.

Ao demonstrar comportamento não linear e limiar-dependente da ventilação atmosférica sobre a dinâmica da SRAG, este estudo reforça a necessidade de incorporar variáveis ambientais como componentes ativos da vigilância epidemiológica em regiões climática e socialmente vulneráveis.

Para facilitar a leitura e destacar os avanços gerados por esta investigação, o **Quadro 1** sintetiza as dez principais contribuições, organizadas por tipo e com indicação da seção do manuscrito onde cada uma é demonstrada.

Quadro 1. Síntese das contribuições do estudo

Tipo de contribuição	Descrição concisa	Local no artigo
Limiares críticos de ventilação	VME $\approx$ 2,0 m/s; VMA $\approx$ 6,5 m/s. Acima destes: redução média mensal de 19,7% (VME) e 51,3% (VMA) nos casos de SRAG.	Resultados (Tabela 6, Figs. 7-8)

Não linearidade da relação	Modelos lineares têm baixo R^2 ; regressão segmentada revela pontos de inflexão que indicam mudanças de regime na transmissão.	Resultados (Tabela 5, Figs. 3-6)
VMA mais sensível que VME	Velocidade máxima do vento apresenta correlação mais forte ($\rho = -0,88$ em 2021) e contraste epidemiológico maior (80,4% dos casos abaixo do limiar).	Resultados (Tabela 4, Tabela 6)
Inovação metodológica (bayesiana)	Regressão segmentada bayesiana com priors fracamente informativas, amostragem NUTS, $R\text{-hat} \leq 1,01$, e HDI 95% para os limiares.	Metodologia (2.6) e Resultados (Figs. 7-8)
Alerta precoce (vigilância)	Proposição de usar VMA $< 6,5$ m/s por dias consecutivos como gatilho para intensificar ações preventivas (comunicação de risco, orientação de ventilação).	Discussão (4.4)
Antecipação do calendário vacinal	Recomendação de iniciar campanhas contra influenza e COVID-19 em fevereiro no Semiárido, em vez de abril/maio, para coincidir com a janela de maior vulnerabilidade ambiental.	Discussão (4.4)
Protocolo de vinculação territorial	Método de pareamento entre SIVEP-Gripe e INMET (fuzzy matching com distância de Levenshtein, limiar 90%, validação manual com 97% de acerto).	Metodologia (2.4)
Preenchimento de lacuna para o Semiárido	Primeiro estudo a quantificar limiares de velocidade do vento associados à SRAG especificamente no Semiárido brasileiro.	Introdução; Discussão (4.5)
Equidade e baixo custo	Indicador baseado exclusivamente em dados públicos do INMET, replicável por qualquer município	Discussão (4.4)

	sem necessidade de infraestrutura adicional.	
Geração de hipóteses para pesquisas futuras	Sugestão de modelos DLNM, estudos individuais (caso-controle), incorporação em modelos SIR/SEIR e análises espaço-temporais.	Discussão (4.5)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELLOS, Christovam *et al.* Mudanças Climáticas e Ambientais e as Doenças Infecciosas: Cenários e Incertezas para o Brasil. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 18, n. 3, p. 285–304, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742009000300011>.

BASHIR, M. F. *et al.* Correlation between Climate Indicators and COVID-19 Pandemic in New York, USA. *Science of the Total Environment*, v. 728, 138835, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138835>.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Programa Nacional de Imunizações (PNI): Campanha Nacional de Vacinação contra a Influenza*. Brasília: Ministério da Saúde, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Sistema de Informação da Vigilância Epidemiológica da Gripe (SIVEP-Gripe): Definição de Caso e Diretrizes de Vigilância da SRAG*. Brasília: Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/saude>.

BREILH, Jaime. *Epidemiología Crítica: Ciencia Emancipadora e Interculturalidad*. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2006.

BRITTER, Rex; HANNA, Steven. Flow and Dispersion in Urban Areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 35, p. 469–496, 2003. Disponível

em: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>.

BUSS, Paulo Marchiori; PELLEGRINI FILHO, Alberto. A Saúde e seus Determinantes Sociais. *Physis: Revista de Saúde Coletiva*, v. 17, n. 1, p. 77–93, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-73312007000100006>.

FENNELLY, Kevin P. Particle Sizes of Infectious Aerosols: Implications for Infection Control. *The Lancet Respiratory Medicine*, v. 8, n. 9, p. 914–924, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30323-4](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30323-4).

GASPARRINI, Antonio. Distributed Lag Linear and Non-Linear Models in R: The Package dlnm. *Journal of Statistical Software*, v. 43, n. 8, p. 1–20, 2011. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v043i08/520>.

GELMAN, Andrew *et al.* *Bayesian Data Analysis*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b16018>.

KEELING, Matt J.; ROHANI, Pejman. *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton: Princeton University Press, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/9781400841035>.

KERMACK, William O.; MCKENDRICK, Anderson G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society A*, v. 115, n. 772, p. 700–721, 1927. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>.

MARENGO, José A. *et al.* Climate Change and Drought in Northeast Brazil: Past, Present, and Future. *Theoretical and Applied*

Climatology, v. 129, p. 1189–1200, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARR, Linsey C.; TANG, Julian W. A Paradigm Shift to Align Transmission Routes with Mechanisms. *Clinical Infectious Diseases*, v. 73, n. 10, p. 1747–1749, 2021.

MORAWSKA, Lidia *et al.* Size Distribution and Sites of Origin of Droplets Expelled from the Human Respiratory Tract during Expiratory Activities. *Journal of Aerosol Science*, v. 40, n. 3, p. 256–269, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.11.002>.

MORAWSKA, Lidia; CAO, Junji. Airborne Transmission of SARS-CoV-2: The World Should Face the Reality. *Environment International*, v. 139, 105730, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>.

MUGGEO, Vito M. R. Estimating Regression Models with Unknown Break-Points. *Statistics in Medicine*, v. 22, n. 19, p. 3055–3071, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sim.1545>.

OKE, T. R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. *Energy and Buildings*, v. 11, n. 1–3, p. 103–113, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6).

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). *Global Surveillance for Human Infection with Novel Coronavirus (2019-nCoV)*. Washington, DC: OPAS, 2020. Disponível em: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51842>.

PEARCE, Neil. The Ecological Fallacy Strikes Back. *Journal of Epidemiology & Community Health*, v. 54, n. 5, p. 326–327, 2000.

Disponível em: <https://doi.org/10.1136/jech.54.5.326>.

ŞAHİN, M. Impact of Weather on COVID-19 Pandemic in Turkey. *Science of the Total Environment*, v. 728, 138810, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138810>.

SALVATIER, John; WIECKI, Thomas V.; FONNESBECK, Christopher. Probabilistic Programming in Python Using PyMC3. *PeerJ Computer Science*, v. 2, e55, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.55>.

SHAMAN, Jeffrey; KOHN, Melvin. Absolute Humidity Modulates Influenza Survival, Transmission, and Seasonality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 9, p. 3243–3248, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0806852106>.

SUSSER, Mervyn. The Logic in Ecological: I. The Logic of Analysis. *American Journal of Public Health*, v. 84, n. 5, p. 825–829, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2105/AJPH.84.5.825>.

VARDOULAKIS, Sotiris *et al.* Modelling Air Quality in Street Canyons: A Review. *Atmospheric Environment*, v. 37, n. 2, p. 155–182, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9).

VEJERANO, Eric P.; MARR, Linsey C. Physico-Chemical Characteristics of Evaporating Respiratory Fluid Droplets. *Journal of the Royal Society Interface*, v. 15, n. 139, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0939>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Global Surveillance for COVID-19 and Severe Acute Respiratory Infections (SARI): Updated Guidance*. Geneva: WHO, 2023. Disponível em: <https://www.who.int>.

¹ Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf), Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6152-5853>

² Fundação Universidade de Brasília (UNB), Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3904-9026>

³ Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf), Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2624-9149>