

Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Exatas
Departamento de Estatística

Rafael Antonio Teodoro da Silva

As chuvas e seu impacto no Produto Interno Bruto do estado de São Paulo

Curitiba

2024

Rafael Antonio Teodoro da Silva

As chuvas e seu impacto no Produto Interno Bruto do estado de São Paulo

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de Laboratório B do curso de graduação em Estatística da Universidade Federal do Paraná, como exigência parcial para obtenção do grau em Bacharel em Estatística.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lucambio Pérez

Curitiba

2024

Dedico este trabalho à minha família, especialmente à minha esposa e aos meus filhos pela compreensão e paciência em um momento tão importante na minha trajetória acadêmica.

Agradecimentos

À minha esposa e aos meus filhos, que nos momentos difíceis compreenderam a necessidade de solitude para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Lucambio, por seu tratamento atencioso, respeitando minhas particularidades e por me auxiliar a explorar novos horizontes em prol do desenvolvimento das ideias deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Federal do Paraná, aos meus colegas de curso e aos professores que contribuíram para minha formação.

“All models are wrong, but some are useful.” - George E. P. Box.

Resumo

Este trabalho analisou o impacto da chuva sobre o Produto Interno Bruto das Regiões Administrativas do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019. Para isso, utilizou-se uma abordagem estatística baseada em dados longitudinais em painel, com modelos específicos para os setores agrícola, industrial e de serviços. As variáveis climáticas estudadas foram o total de precipitação e o número de dias de chuva por trimestre, enquanto os dados econômicos foram os índices trimestrais do PIB calculados pela Fundação Seade. No setor agrícola, os resultados indicaram que regimes de chuva equilibrados favorecem o desempenho do PIB, enquanto períodos de chuvas prolongadas e de baixo volume são prejudiciais. Já o setor industrial mostrou maior sensibilidade a volumes elevados de precipitação e o setor de serviços, menos influenciado pelas condições climáticas. Os resultados destacam a importância de políticas públicas regionais que considerem as diferenças setoriais frente aos efeitos climáticos, destacando a relevância do uso de dados em painel para análise integrada de questões econômicas e ambientais.

Palavras-chave: Chuva. PIB. Dados em painel. Regiões Administrativas. São Paulo.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Boxplot dos Dias de Chuva por RA.....	29
Figura 2 - Boxplot da Precipitação Total por RA.....	29
Figura 3 - Índice do PIB trimestral (2010-2019) do Agronegócio por RA.....	30
Figura 4 - Índice do PIB trimestral (2010-2019) da Indústria por RA.....	31
Figura 5 - Índice do PIB trimestral (2010-2019) do setor de Serviços por RA.....	32
Figura 6 – Efeitos Atuais e Defasados no Índice do PIB da Agricultura.....	37
Figura 7 – Efeito Combinado de Precipitação e Dias de Chuva no PIB Agrícola.....	38
Figura 8 – Efeitos Atuais e Defasados no Índice do PIB da Indústria.....	42
Figura 9 – Efeito Combinado de Precipitação e Dias de Chuva no PIB Indústria.....	43
Figura 10 – Efeitos Atuais e Defasados no Índice do PIB de Serviços.....	46
Figura 11 – Efeito Combinado de Precipitação e Dias de Chuva no PIB Serviços.....	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estatísticas de Dias de Chuva por RA.....	27
Tabela 2 - Estatísticas de Precipitação (mm) por RA.....	28
Tabela 3 - Resultados estatísticos do modelo estimado para o setor da agricultura..	35
Tabela 4 - Resultados estatísticos do modelo estimado para o setor da indústria.....	41
Tabela 5 - Resultados estatísticos do modelo estimado para o setor de serviços.....	45

Lista de Abreviaturas e Siglas

IBGE – Instituto Brasileiro de Estatística e Economia

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

OMS – Organização Mundial da Saúde

PIB – Produto Interno Bruto

plm - Pacote estatístico para análise de dados em painel no *software* R

RA – Região Administrativa

RMSP - Região Metropolitana de São Paulo

Seade - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados Estatísticos

SJC – São José dos Campos

SJRP – São José do Rio Preto

Sumário

	Lista de ilustrações.....	6
	Lista de tabelas.....	7
	Lista de abreviações e siglas.....	8
1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1.	Material.....	17
3.1.1	Conjunto de Dados.....	17
3.1.2	Recursos Computacionais.....	20
3.2	Métodos.....	22
3.2.1	Seleção de Variáveis.....	22
3.2.2	Estruturação dos Dados em Painel.....	23
3.2.3	Modelagem Estatística.....	23
3.2.3.1	Análise dos Efeitos Defasados.....	24
3.2.4	Testes Estatísticos.....	25
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1	Análise Descritiva.....	27
4.2	Modelagem Estatística.....	32
4.2.1	Modelo para o Setor Agrícola.....	32
4.2.2	Modelo para o Setor Industrial.....	39
4.2.3	Modelo para o Setor de Serviços.....	44
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

Os debates sobre os efeitos das mudanças climáticas são cada vez mais relevantes na agenda internacional (LIMA; LAYRARGUES, 2014). Países, instituições não governamentais, empresas e a sociedade em geral, discutem os impactos dessas mudanças a nível global, já que seus efeitos atingem todas as regiões, sem distinção de quem será afetado.

Um dos problemas causados pelas mudanças climáticas é a ocorrência de fenômenos extremos, como as secas e tempestades, que trazem grandes prejuízos para as regiões afetadas, como danos a infraestrutura, migrações populacionais, mortes e perdas financeiras.

Em se tratando dos impactos financeiros gerados pelas mudanças climáticas, segundo (LIANG, 2022), um desastre natural local, além de causar prejuízo para a região atingida, pode afetar negativamente a economia de outras regiões interdependentes, em decorrência da globalização do comércio.

Além dos fenômenos naturais de grande poder destrutivo, há mudanças mais sutis no clima que também afetam o cotidiano da população e que geram reflexos no desempenho das economias. Kotz, Levermann e Wenz (2022) demonstraram que, em nível global, um excesso na distribuição das chuvas diárias reduz drasticamente as taxas de crescimento macroeconômico. Os autores observaram que este resultado contrasta com estudos anteriores, que avaliaram apenas a precipitação média sazonal ou anual de chuvas em nível nacional, desconsiderando as mudanças menos significativas e que se prolongavam por mais tempo, mas que traziam reflexos negativos nas atividades econômicas.

No território brasileiro, com suas dimensões continentais e diversidade interna, as mudanças climáticas causam impactos não uniformes em diversas regiões e setores da economia (HADDAD et al., 2010). Isso traz complexidade na mensuração dos efeitos na atividade econômica, considerando as diferenças climáticas e estruturais em cada localidade.

Diante da dificuldade e da importância de se mensurar os impactos econômicos ocasionados pelas mudanças climáticas, a proposta inicial deste projeto foi investigar a influência das chuvas no desempenho de um importante indicador econômico, o Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, que representa a soma de todos os bens e serviços finais produzidos em uma determinada região, geralmente um país, durante um período específico, usualmente um ano¹, focando em diferentes regiões e setores econômicos.

No entanto, devido à limitação de dados trimestrais detalhados em nível regional e setorial, o escopo do estudo foi ajustado para analisar especificamente o estado de São Paulo. Essa escolha baseou-se na disponibilidade de dados trimestrais do PIB segmentados por setor e por região administrativa, fornecidos pela Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados Estatísticos (Seade), órgão vinculado à Secretaria da Fazenda e Planejamento e responsável por divulgar estatísticas, informações, estudos socioeconômicos e demográficos do estado de São Paulo.

Além de ser a unidade federativa com dados trimestrais robustos para diferentes regiões do estado, São Paulo é de extrema relevância para o cenário econômico brasileiro, representando, segundo dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) 30,2% do PIB nacional.

A economia paulista combina uma diversidade significativa entre as atividades agrícolas, industriais e de serviços, o que permite uma análise abrangente dos diferentes impactos das chuvas em cada um desses setores e suas respectivas regiões. Essa riqueza de dados e a importância econômica do estado tornam São Paulo um excelente ente federativo para a análise da influência das chuvas nos diferentes setores econômicos.

¹O PIB é utilizado para medir o desempenho econômico de um país e comparar o nível de riqueza e desenvolvimento econômico entre diferentes nações. Conforme definido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), "o PIB é a medida da produção de bens e serviços em uma economia, obtida a partir da agregação dos valores adicionados em todas as atividades produtivas e dos impostos sobre produtos líquidos de subsídios" (IBGE, 2024).

Portanto, este projeto tem como a hipótese da pesquisa que variações significativas no regime de chuvas têm impactos diferenciados nos três grandes setores da economia paulista, com efeitos que podem variar conforme as características produtivas de cada região administrativa.

Para testar esta hipótese, o projeto tem como objetivo principal analisar os efeitos das chuvas sobre o desempenho dos setores econômicos do estado de São Paulo, através do desenvolvimento de modelos estatísticos que permitam quantificar estes impactos.

Como objetivos secundários, o trabalho busca desenvolver modelos estatísticos específicos para cada setor (agrícola, industrial e de serviços) e analisar os efeitos da precipitação no PIB de cada setor.

A compreensão destas relações pode contribuir tanto para o planejamento econômico quanto para a elaboração de políticas públicas que visem mitigar os impactos econômicos de eventos climáticos extremos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os dados em painel, também conhecidos como dados longitudinais, representam uma estrutura de organização de dados que combina informações sobre diversas unidades observacionais (indivíduos, empresas, regiões, países, entre outros) ao longo de um período. Essa abordagem tem ganhado destaque em estudos empíricos devido à sua capacidade de fornecer informações robustas sobre a dinâmica de variáveis dependentes e explicativas em diferentes contextos temporais e espaciais.

De acordo com Baltagi (2021), uma das principais vantagens dos dados em painel é a capacidade de controlar a heterogeneidade não observável entre as unidades analisadas, permitindo que os modelos capturem os efeitos fixos e aleatórios. Os efeitos fixos tratam as diferenças entre unidades como constantes ao longo do tempo, enquanto os efeitos aleatórios assumem que essas diferenças são não correlacionadas com as variáveis explicativas. Essa flexibilidade torna os modelos de dados em painel adequados para diversos tipos de análises econômicas, sociais e ambientais.

Outra vantagem do uso de dados em painel segundo Croissant e Millo (2018) é que os modelos aproveitam tanto a variabilidade seccional quanto temporal dos dados, o que melhora a eficiência dos estimadores em comparação com modelos que utilizam apenas séries temporais ou dados seccionais.

Os modelos estatísticos/econométricos para dados em painel podem ser divididos em três categorias principais de modelos lineares: o *pooling*, de efeitos fixos e de efeitos aleatórios.

O modelo *pooling* é um modelo linear que assume que não há diferenças entre as unidades observadas, aplicando os mesmos coeficientes a todos os indivíduos, sendo adequado apenas em contextos em que essa suposição é validada.

Por outro lado, o modelo de efeitos fixos controla as diferenças específicas de cada unidade, sendo apropriado quando essas diferenças estão correlacionadas com as variáveis explicativas.

Por fim, o modelo de efeitos aleatórios trata essas diferenças como um componente estocástico, sendo recomendado quando essas diferenças não são correlacionadas com as variáveis explicativas.

A escolha entre efeitos fixos e aleatórios pode ser avaliada pelo teste de Hausman, que avalia a consistência dos estimadores de efeitos aleatórios em relação aos de efeitos fixos. Caso os efeitos aleatórios sejam inconsistentes, deve-se dar preferência aos efeitos fixos (CROISSANT; MILLO, 2008).

No contexto de estudos econômicos e climáticos, estudos recentes têm aplicado a estrutura de dados em painel para investigar a relação entre variáveis climáticas e o desempenho econômico em diferentes contextos. Kotz, Levermann e Wenz (2022) utilizaram um painel global de países para avaliar o impacto de mudanças nos padrões de chuva sobre o crescimento do PIB, encontrando efeitos negativos de eventos extremos de precipitação.

Henseler e Schumacher (2019) analisaram o efeito de choques de temperatura no PIB e nos fatores de produção de 103 países usando um painel com efeitos fixos. Já Kahn et al. (2021) investigaram a relação entre temperatura e precipitação no crescimento econômico de longo prazo de 174 países por meio de dados em painel.

As pesquisas sobre o impacto de variáveis climáticas no desempenho econômico utilizam dados em painel para controlar por fatores fixos regionais, como topografia e infraestrutura, enquanto analisam a variabilidade temporal de fenômenos climáticos, como precipitação e temperatura.

Além disso, os avanços em *softwares* estatísticos, como o pacote *plm* no R, têm simplificado a implementação de modelos de dados em painel. Esse pacote oferece uma interface robusta para estimar modelos de *pooling*, efeitos fixos e aleatórios (CROISSANT; MILLO, 2008). Assim, análise de dados em painel emergem

como uma ferramenta metodológica importante para problemas que envolvem múltiplos fatores.

Esse método é especialmente relevante para o presente estudo, que busca analisar o impacto da chuva no PIB das Regiões Administrativas do estado de São Paulo, estado esse que possui uma economia diversificada e dinâmica, respondendo por cerca de um terço do PIB brasileiro. Sua agricultura é altamente produtiva, com destaque para culturas como cana-de-açúcar e laranja. A indústria paulista é a mais desenvolvida do país, abrangendo setores como automobilístico, químico, aeroespacial, de máquinas e equipamentos. Já o setor de serviços é bastante heterogêneo, com destaque para os serviços financeiros e hospitalar de alta sofisticação (SÃO PAULO, 2022).

Quanto as chuvas, o estado de São Paulo apresentam uma distribuição pluviométrica diversificada, influenciada por sua topografia e localização geográfica, com maiores volumes no litoral e diminuição em direção ao interior (MARTINELLI, 2010).

O clima pode ser dividido em duas estações predominantes: uma estação chuvosa, de outubro a abril, influenciada pelo aquecimento continental, convecção tropical, sistemas extratropicais e áreas de instabilidade continental; e uma estação seca, de maio a setembro, caracterizada pela diminuição da precipitação e temperaturas, além da ocorrência de períodos de grande estabilidade atmosférica, predominantemente influenciada por sistemas de alta pressão (CETESB, 2023). Além das características gerais observadas nessas duas estações, o estado apresenta regiões com fortes contrastes climáticos, resultado das diferentes características geográficas, como relevo e vegetação.

Entre os fatores geográficos que influenciam a climatologia nas escalas local e regional, destacam-se a proximidade do mar e a presença de montanhas e depressões, que criam fenômenos como brisa marítima e terrestre, circulação de vale-montanha, entre outros (CETESB, 2023).

Essa variabilidade climática e a ocorrência de eventos extremos de precipitação, como secas prolongadas ou chuvas intensas, podem ter impactos significativos nas atividades econômicas do estado. Conforme apontado por NOBRE et al. (2010), esses eventos extremos podem afetar especialmente a agricultura e os setores dependentes de recursos hídricos, uma vez que a disponibilidade de água é um fator crucial para a produção agrícola e para o funcionamento de outros segmentos.

Diante desse contexto, esses fundamentos teóricos e metodológicos embasam a análise do impacto da precipitação no PIB das Regiões Administrativas de São Paulo, garantindo uma abordagem robusta e contextualizada. A combinação de séries trimestrais de precipitação acumulada e dias de chuva com dados do PIB separados por setor de atividade permite capturar a diferença espacial e temporal dessa relação, controlando fatores não observados específicos de cada região. Além disso, a estrutura em painel viabiliza a investigação de efeitos defasados das chuvas sobre o desempenho econômico, bem como a comparação entre os setores da agropecuária, indústria e serviços.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1 Conjunto de Dados

A seleção do conjunto de dados foi uma etapa crucial e exaustiva no desenvolvimento deste estudo, uma vez que a análise proposta exigia informações detalhadas e consistentes sobre o PIB trimestral das Regiões Administrativas (RAs) do estado de São Paulo e dados meteorológicos relacionados à precipitação acumulada e dias de chuva. Essa etapa envolveu decisões metodológicas e consultas a diferentes fontes para garantir a qualidade e adequação das informações utilizadas.

Dados do PIB

Inicialmente, a busca por dados de PIB focou em informações desagregadas em termos regionais e setoriais, com periodicidade trimestral. O IBGE, órgão responsável pelo cálculo do PIB no Brasil, foi identificado como a fonte mais confiável para esse tipo de informação. No entanto, verificou-se que o IBGE não disponibiliza dados trimestrais para setores econômicos desagregados em regiões menores que os estados, limitando sua aplicabilidade para este trabalho. Dados municipais, embora disponíveis, possuem periodicidade apenas anual, o que inviabilizaria a análise da sazonalidade associada aos impactos climáticos.

O estado de São Paulo, por meio da Seade, apresenta uma metodologia diferenciada, disponibilizando o PIB trimestral por Regiões Administrativas (RA), que são subdivisões criadas pelo Decreto Estadual nº 26.581, de 1987. As RAs abrangem agrupamentos de municípios com características socioeconômicas similares, sendo as principais divisões utilizadas no planejamento regional do estado.

Essa desagregação geográfica e setorial é essencial para capturar a diferença dos efeitos da precipitação na economia, uma vez que diferentes setores e regiões podem apresentar características distintas. Essa organização permitiu atender à

necessidade do estudo de vincular os dados do PIB a uma granularidade geográfica menor do que a estadual.

Para o PIB, a Seade divulga 9 produtos e destacou-se o resultado do PIB pela ótica da Produção (ou Produto) através dos Índices Trimestrais do Valor Adicionado por Setores de Atividade Econômica (Agropecuária, Indústria e Serviços) para cada RA do estado de São Paulo, disponível para os trimestres de 2002 a 2024.

Os dados das RAs utilizadas nesse estudo foram obtidos com base no último Anuário Estatístico do Estado de São Paulo (2003) disponibilizado pela Seade, que detalha a composição de cada região em termos de municípios. No total são 15 RA, sendo elas: 1) Araçatuba, 2) Barretos, 3) Bauru, 4) Campinas, 5) Central, 6) Franca, 7) Marília, 8) Presidente Prudente, 9) Registro, 10) Ribeirão Preto, 11) Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), 12) Santos, 13) São José dos Campos (SJC), 14) São José do Rio Preto (SJRP) e 15) Sorocaba. Após a validação dessas informações, foi realizada a consolidação dos índices trimestrais para cada RA e setor econômico.

Dados de Precipitação

A obtenção dos dados de chuva também exigiu um esforço considerável. Buscou-se encontrar informações com uma granularidade geográfica compatível com as Regiões Administrativas do estado de São Paulo. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão responsável pela medição de chuva no Brasil, disponibiliza dados de precipitação através do seu Banco de Dados Meteorológicos. No entanto, esses dados são provenientes de estações distribuídas de forma heterogênea pelo território, exigindo um tratamento cuidadoso para sua utilização.

O Banco de Dados Meteorológicos disponibiliza informações das estações meteorológicas automáticas em todo o território nacional, com registro a cada hora do volume de precipitação total (mm), variáveis de pressão atmosférica, radiação global, temperatura, umidade relativa do ar e dos ventos. Neste trabalho a variável escolhida foi a precipitação total horária (mm) por ser a mais diretamente relacionada ao objetivo do estudo.

No estado de São Paulo, foram identificadas 40 estações meteorológicas automáticas no período analisado. Contudo, para garantir consistência temporal, foram selecionadas 30 estações com dados contínuos entre 2010 e 2019. A vinculação das estações às RAs foi feita com base na localização geográfica de cada estação e sua correspondência com os municípios componentes das RAs, utilizando coordenadas de latitude e longitude para validação.

O estudo apresentou limitações relacionadas aos dados meteorológicos. A primeira limitação refere-se à instalação das estações meteorológicas em períodos distintos, o que exigiu a adoção de um recorte temporal que garantisse a cobertura mínima de uma estação em cada RA.

Uma segunda limitação foi a ausência de estações meteorológicas na Região Administrativa de Santos. Para contornar essa limitação, utilizou-se a estação de Iguape, localizada na Região Administrativa de Registro, como representativa para Santos, devido à proximidade geográfica e às características climáticas semelhantes.

Para cada estação meteorológica e ano, foram necessárias as seguintes etapas de tratamento dos dados:

- 1) Transformação do volume de precipitação de horário para diário através da soma da precipitação horária;
- 2) Tratamento dos dados ausentes, removendo marcações inválidas;
- 3) Criação de um campo para identificar os dias com precipitação acima de zero;
- 4) Agrupamento dos dados de precipitação e dias de chuva em trimestres;
- 5) Vinculação dos resultados de precipitação às RAs, considerando a média entre as estações nos casos em que havia mais de uma estação por região.

Para este estudo, foi decidido utilizar o período de 2010 a 2019, devido à disponibilidade de dados meteorológicos consolidados para todas as RAs no mesmo período. A exclusão de 2020 deveu-se aos impactos econômicos causados pela pandemia de COVID-19, decretada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em março de 2020, que poderiam distorcer os resultados.

Base Consolidada

Após o tratamento dos dados de precipitação, foi necessário consolidá-los com os dados do PIB trimestral por setor de atividade econômica. A partir das etapas descritas, foi gerada uma base consolidada contendo as seguintes variáveis para cada RA e trimestre:

- 1) Região Administrativa (RA);
- 2) Trimestre;
- 3) Precipitação total (mm);
- 4) Dias de chuva (número);
- 5) Índices trimestrais do PIB por Valor Adicionado no setor da Agricultura;
- 6) Índices trimestrais do PIB por Valor Adicionado no setor da Indústria;
- 7) Índices trimestrais do PIB por Valor Adicionado no setor de Serviços.

Por fim, os dados foram organizados no formato exigido pelo pacote *plm* do *software* R, que exige uma estrutura específica para análises em painel. Essa organização incluiu a criação de uma variável sequencial representando os trimestres (de 1 a 40). Essa estruturação foi essencial para garantir a correta aplicação dos modelos estatísticos.

3.1.2 Recursos Computacionais

O processamento e a análise dos dados utilizados neste estudo exigiram a utilização de recursos computacionais específicos para manipulação, processamento e modelagem estatística, devido à natureza dos dados em cada etapa, provenientes de diferentes fontes e com estruturas distintas, foi necessário um esforço significativo para sua organização, tratamento e consolidação.

Para a etapa de tratamento dos dados de precipitação de chuva, obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos do INMET, utilizou-se o *software* Microsoft Excel 365. Essa escolha se deu pela facilidade de manipulação dos dados em planilhas eletrônicas, permitindo a realização das seguintes tarefas:

- 1) Importação dos dados brutos de precipitação, disponibilizados em arquivos ZIP contendo planilhas individuais para cada estação meteorológica e ano;
- 2) Transformação do volume de precipitação de horário para diário, através da soma dos valores horários;
- 3) Tratamento dos dados ausentes, removendo marcações inválidas "-9999";
- 4) Criação de um campo adicional para identificar os dias com precipitação acima de zero;
- 5) Agrupamento dos dados de precipitação e dias de chuva em períodos trimestrais;
- 6) Vinculação dos resultados de precipitação às respectivas Regiões Administrativas, considerando a média entre as estações nos casos em que havia mais de uma estação por região.

O uso do Excel 365 permitiu a automação de etapas do processo, através da criação de fórmulas, tornando o tratamento dos dados mais eficiente e menos suscetível a erros humanos.

Após a consolidação dos dados de precipitação, foi necessário combiná-los com as informações do PIB trimestral por setor de atividade econômica, obtidas junto à Seade. Para essa etapa, também se utilizou o Excel 365, aproveitando sua capacidade de integração de dados de diferentes fontes e sua interface intuitiva para a organização das informações.

Com o conjunto de dados devidamente tratado e consolidado, passou-se à etapa de análise estatística e modelagem. Para isso, optou-se pela utilização do *software* RStudio, uma interface integrada para a linguagem de programação R.

No RStudio, foram utilizados pacotes especializados que facilitaram o processo de análise e modelagem. Entre todos os pacotes destaca-se a escolha do *plm* (*Panel Linear Models*) para ajuste dos modelos de dados em painel.

Esse pacote oferece uma interface consistente e flexível para a especificação, estimação de modelos de dados em painel, incluindo *pooling*, efeitos fixos e efeitos aleatórios e de teste como Hausman.

3.2 Métodos

Para realizar a análise do impacto da precipitação sobre o PIB das RAs do estado de São Paulo, foi adotado um protocolo metodológico dividido em etapas envolvendo seleção de variáveis, construção e validação de modelos econométricos, e análise dos resultados.

A análise dos dados deste estudo foi realizada utilizando a abordagem de dados em painel, que combina informações de diversas unidades observacionais (RAs) ao longo do tempo (trimestres). Essa metodologia é especialmente adequada para lidar com a heterogeneidade regional e temporal presente nos dados, permitindo a investigação dos efeitos da precipitação sobre o desempenho econômico dos setores agrícola, indústria e serviços nas diferentes RAs do estado de São Paulo.

3.2.1 Seleção de Variáveis

A escolha das variáveis foi um passo fundamental para garantir a robustez do modelo e a relevância dos resultados obtidos. As variáveis selecionadas basearam-se na literatura existente sobre o impacto de variáveis climáticas na economia e na disponibilidade de dados confiáveis.

Dados Climáticos

Os dados climáticos utilizados foram extraídos das Estações Meteorológicas Automáticas do INMET. Duas variáveis foram consideradas para representar as condições de precipitação:

- 1) **PREC_Tot**: Total de precipitação acumulada no trimestre (em milímetros);
- 2) **Dias_Chuva**: Número de dias com registro de precipitação acima de 0 mm no trimestre.

Essas variáveis foram escolhidas devido à sua capacidade de capturar tanto o volume total de precipitação quanto a frequência de eventos chuvosos, aspectos importantes para avaliar o impacto climático nas atividades econômicas.

Variáveis Econômicas

Os dados do PIB trimestral disponibilizados pela Seade foram utilizados para representar a atividade econômica. Cada setor foi analisado separadamente, considerando os índices trimestrais de valor adicionado com base 100 no ano de 2010:

- 1) PIB_Agro_I dx: Índice do PIB do setor agrícola;
- 2) PIB_Ind_I dx: Índice do PIB do setor industrial;
- 3) PIB_Serv_I dx: Índice do PIB do setor de serviços.

3.2.2 Estruturação dos Dados em Painel

Os dados foram organizados no formato de painel (longitudinal), uma vez que esta abordagem permite capturar simultaneamente as dimensões temporal e regional das variáveis. O painel incluiu observações trimestrais de 2010 a 2019 para cada uma das 15 RAs do estado de São Paulo.

3.2.3 Modelagem Estatística

Os modelos foram estimados utilizando o pacote `plm` do *software* RStudio. Este pacote foi escolhido devido à sua robustez para análise de dados em painel, permitindo a especificação de modelos de *pooling*, efeitos fixos e efeitos aleatórios.

- 1) *Pooling*: Considera as observações como homogêneas, sem distinções específicas entre as unidades ou períodos. O modelo tem a forma:

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + \varepsilon_{it}$$

- 2) Efeitos Fixos: Controla diferenças não mensuráveis específicas de cada região e/ou período, supondo que elas permaneçam constantes ao longo do tempo. Em sua forma unidimensional:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta x_{it} + \varepsilon_{it}$$

- 3) Efeitos Aleatórios: Modela as diferenças inobserváveis como aleatórias, assumindo ausência de correlação com as variáveis explicativas. Em sua forma unidimensional:

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + (\mu_i + \varepsilon_{it})$$

Modelos com efeitos bidirecionais (*twoways*) foram utilizados para capturar tanto as heterogeneidades regionais quanto as tendências temporais.

Para efeitos fixos bidirecionais:

$$y_{it} = (\alpha_i + \gamma_t) + \beta x_{it} + \varepsilon_{it}$$

E para efeitos aleatórios bidirecionais:

$$y_{it} = \alpha + \beta x_{it} + (\mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it})$$

Onde:

i representa a unidade individual (RA)

t representa o período (trimestre)

y_{it} é a variável dependente

x_{it} são as variáveis explicativas

β são os coeficientes

α é o intercepto comum

α_i são os efeitos fixos individuais

γ_t são os efeitos fixos temporais

μ_i são os efeitos aleatórios individuais

λ_t são os efeitos aleatórios temporais

ε_{it} é o termo de erro

3.2.3.1 Análise dos Efeitos Defasados

Modelos com defasagens de duas unidades (dois trimestres) foram incluídos para capturar possíveis efeitos retardados da precipitação sobre o PIB:

- 1) $\text{lag}(\text{PREC_Tot}, 2)$: Representa o impacto acumulado da precipitação em trimestres anteriores.

- 2) $\text{lag}(\text{Dias_Chuva}, 2)$: Captura os efeitos de eventos chuvosos frequentes em períodos passados.

Essa abordagem foi adotada com base na literatura, que aponta que os impactos econômicos de variáveis climáticas frequentemente se manifestam de forma retardada, especialmente em setores como agricultura e indústria.

3.2.4 Testes Estatísticos

A escolha do modelo mais adequado entre *pooling*, efeitos fixos e efeitos aleatórios foi realizada por meio de uma sequência de testes estatísticos utilizados em dados em painel: o Teste F de Chow, o Teste de Breusch-Pagan e, por fim, o Teste de Hausman (CROISSANT; MILLO, 2024). Esses testes foram implementados no *software* R, utilizando o pacote *plm*.

O Teste F de Chow foi aplicado inicialmente para comparar o modelo *pooling* com o modelo de efeitos fixos. Este teste avalia se os efeitos fixos individuais (específicos para cada região do painel) são necessários ou se é possível usar um modelo *pooling*, que assume homogeneidade entre as unidades. A hipótese nula (H_0) do Teste F indica que os efeitos fixos não são significativos, ou seja, o modelo *pooling* é preferível. A hipótese alternativa (H_1) sugere que os efeitos fixos são estatisticamente relevantes e, portanto, o modelo de efeitos fixos é mais adequado.

Após a aplicação do Teste F, foi realizado o Teste de Breusch-Pagan para decidir entre o modelo *pooling* e o modelo de efeitos aleatórios. Este teste verifica se a variância dos efeitos aleatórios individuais (μ_i) é diferente de zero, ou seja, se há evidências de efeitos aleatórios nas unidades do painel. A hipótese nula (H_0) do Teste Breusch-Pagan é que $\text{Var}(\mu_i) = 0$, indicando que o modelo *pooling* é apropriado. A hipótese alternativa (H_1) é que $\text{Var}(\mu_i) > 0$ sugere a presença de variância significativa nos efeitos aleatórios individuais, recomendando o uso do modelo de efeitos aleatórios.

Por fim, o Teste de Hausman foi aplicado para decidir entre o modelo de efeitos fixos e o modelo de efeitos aleatórios. Este teste avalia se os efeitos aleatórios são

não correlacionados com as variáveis explicativas, uma suposição para a consistência do modelo de efeitos aleatórios. A hipótese nula (H_0) do teste sugere que os efeitos aleatórios são consistentes. A hipótese alternativa (H_1) indica que os efeitos aleatórios são inconsistentes, recomendando o uso do modelo de efeitos fixos.

Essa sequência de testes estatísticos permitiu a escolha do modelo mais apropriado para analisar a relação entre variáveis climáticas e o desempenho econômico nos setores agrícola, industrial e de serviços, assegurando rigor metodológico e validade estatística.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Descritiva

A análise descritiva inicial dos dados é fundamental para compreender a distribuição das variáveis e identificar padrões e anomalias que possam influenciar os resultados da modelagem. No presente estudo, foram avaliados os dados de precipitação, dias de chuva e os índices do PIB por setor de atividade econômica (agricultura, indústria e serviços) para as 15 RAs do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019.

Nesta seção, apresentam-se as estatísticas descritivas das variáveis climáticas PREC_Tot (precipitação total trimestral) e Dias_Chuva (número de dias com chuva no trimestre), tabelas 1 e 2 respectivamente. Foram calculados o valor mínimo, máximo e a média para cada região.

Tabela 1 - Estatísticas de Dias de Chuva por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

RA	Mínimo	Máximo	Média
Araçatuba	3	56	28.8
Barretos	5	65	34.8
Bauru	8	56.3	27.6
Campinas	8	59	31.8
Central	4.5	67	30.1
Franca	4.5	64	32.8
Marília	6	58	36.3
Presidente Prudente	6	47.5	26.9
Registro	4	81	54.7
Ribeirão Preto	2	52	28.9
RMSP	12	65	38.4
Santos	1	71	49.4
SJC	30.7	70	49.3
SJRP	3	51	28.7
Sorocaba	28.8	51.5	42.6

A análise das tabelas evidenciou que a região de Registro apresenta em média, o maior número de dias chuvosos por trimestre. Adicionalmente, observou-se maior precipitação total em Santos, reforçando sua localização litorânea como fator relevante.

Tabela 2 - Estatísticas de Precipitação (mm) por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

RA	Mínimo	Máximo	Média
Araçatuba	36.4	923	340
Barretos	2.2	781	287
Bauru	32.7	691	273
Campinas	22.9	705	274
Central	27.6	940	289
Franca	19.2	839	324
Marília	2.4	816	321
Presidente Prudente	32	751	303
Registro	2.4	920	398
Ribeirão Preto	0.4	656	239
RMSP	47	953	396
Santos	1	1364	496
SJC	45.3	789	317
SJRP	10.2	935	264
Sorocaba	67.5	620	307

Observa-se uma distinção entre as regiões litorâneas e do interior. A RA de Santos apresenta as maiores médias de precipitação trimestral, próximo dos 500 mm, com maior regularidade na distribuição ao longo do trimestre, com médias de dia de chuva superior a 49 dias por trimestre, bem como a RA de Registro com aproximadamente 400 mm de precipitação por trimestre. Em contraste, regiões do interior como Ribeirão Preto, Barretos e São José do Rio Preto registraram médias inferiores a 300 mm por trimestre.

Os gráficos de *boxplot* permitem visualizar a dispersão dos dados e identificar *outliers* em algumas regiões. No caso de Dias Chuva as RA próximas do litoral, Santos e Registro, destacaram-se pelo maior número de dias com precipitação significativa e presença de *outliers*.

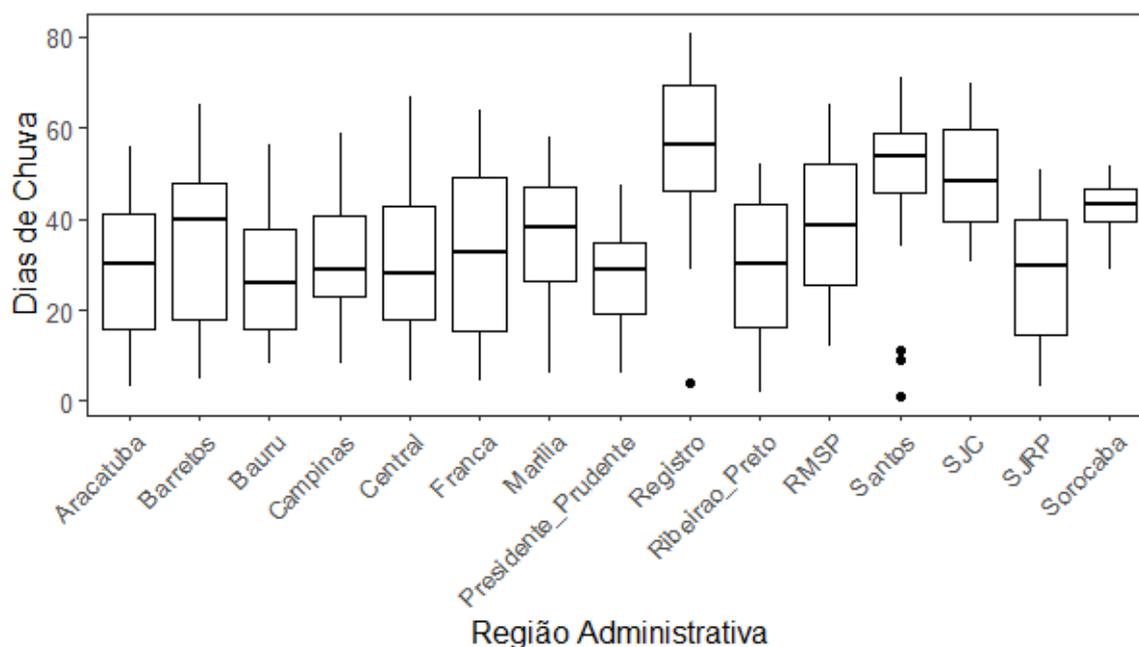


Figura 1 – *Boxplot* dos dias de chuva por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

Os dados de precipitação apresentam uma alta variabilidade entre as RAs refletindo as características climáticas heterogêneas do estado.

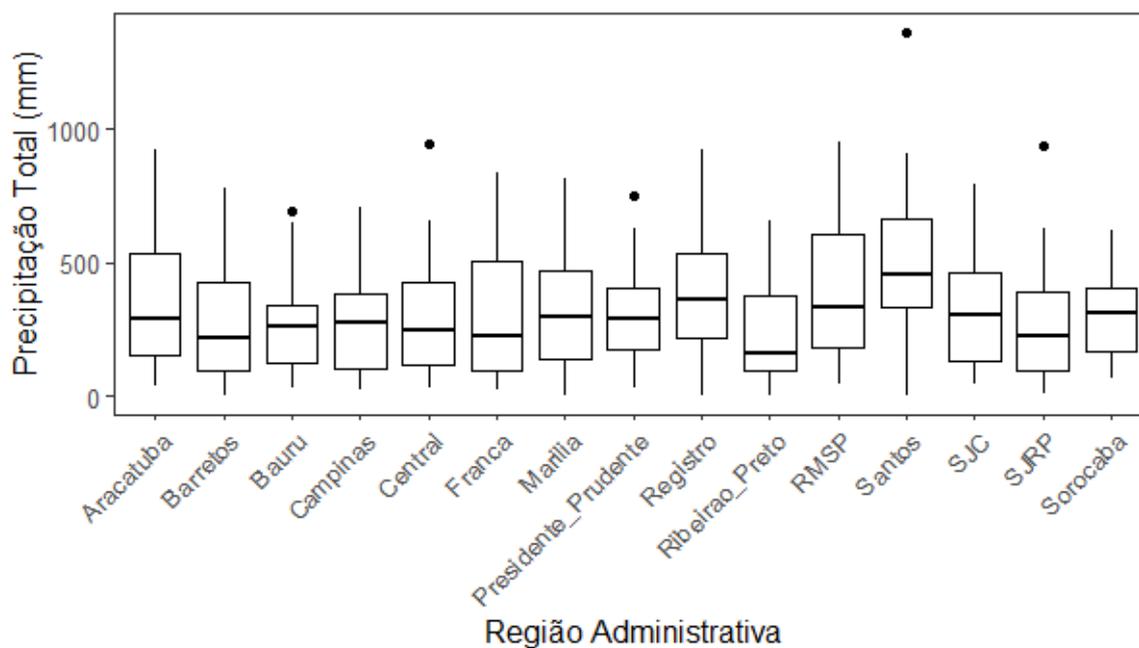


Figura 2 – *Boxplot* da precipitação total por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

Os índices do PIB por setor de atividade econômica também demonstraram diferenças marcantes entre as Regiões Administrativas. Avaliando o PIB da agricultura, as RAs de São José do Rio Preto, Central, Sorocaba, São José dos Campos e Presidente Prudente destacaram-se com os maiores valores médios no índice do PIB da Agropecuária, indicando forte presença do setor agrícola. As RAs de Barretos, Central, São José do Rio Preto e Ribeirão Preto também se destacam pelos picos do PIB nos terceiros trimestres.

As RAs de Santos e a RMSP apresentaram os menores índices médios, o que era esperado, dado o perfil urbano e a ausência de atividades agrícolas significativas.

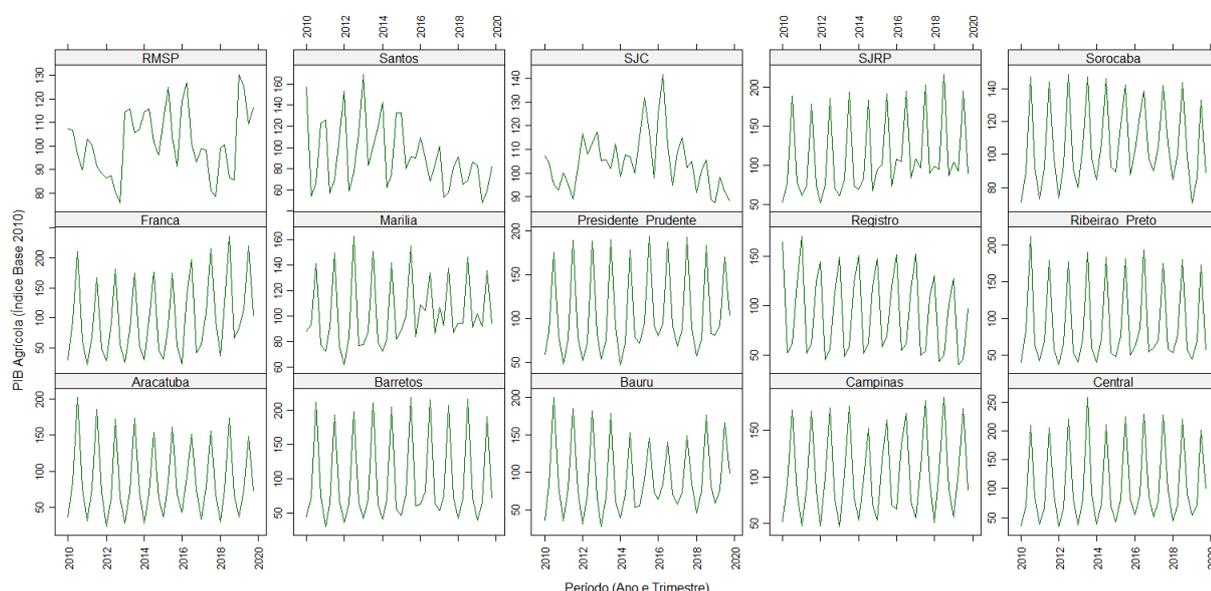


Figura 3 – Índice do PIB trimestral agrícola por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

Com relação ao PIB industrial, a RA de Registro apresenta uma média extremamente elevada do Índice do PIB (628,51), indicando valores discrepantes em relação às demais regiões. De acordo com a Fundação Seade (2024), este aumento expressivo está associado ao início da extração de petróleo nas plataformas do Pré-Sal. Embora a produção ocorra em alto-mar, o IBGE atribui o valor adicionado aos municípios litorâneos adjacentes aos campos de produção.

Essa metodologia, descrita na publicação “Produto Interno Bruto dos Municípios” do IBGE (2016), justifica que o valor adicionado bruto é distribuído entre os municípios confrontantes com as áreas de produção *offshore*.

Como o PIB Regional divulgado pela Fundação Seade se baseia na estrutura econômica definida pelo PIB dos municípios, os dados refletem essa convenção. Conseqüentemente, o aumento significativo na atividade industrial da RA de Registro é explicado pela inclusão do valor adicionado das atividades de extração de petróleo.

As RAs de Santos, Franca, São José do Rio Preto, São José dos Campos e Campinas apresentam os maiores valores médios do índice do PIB da Indústria, reforçando sua posição como polo industrial do estado.

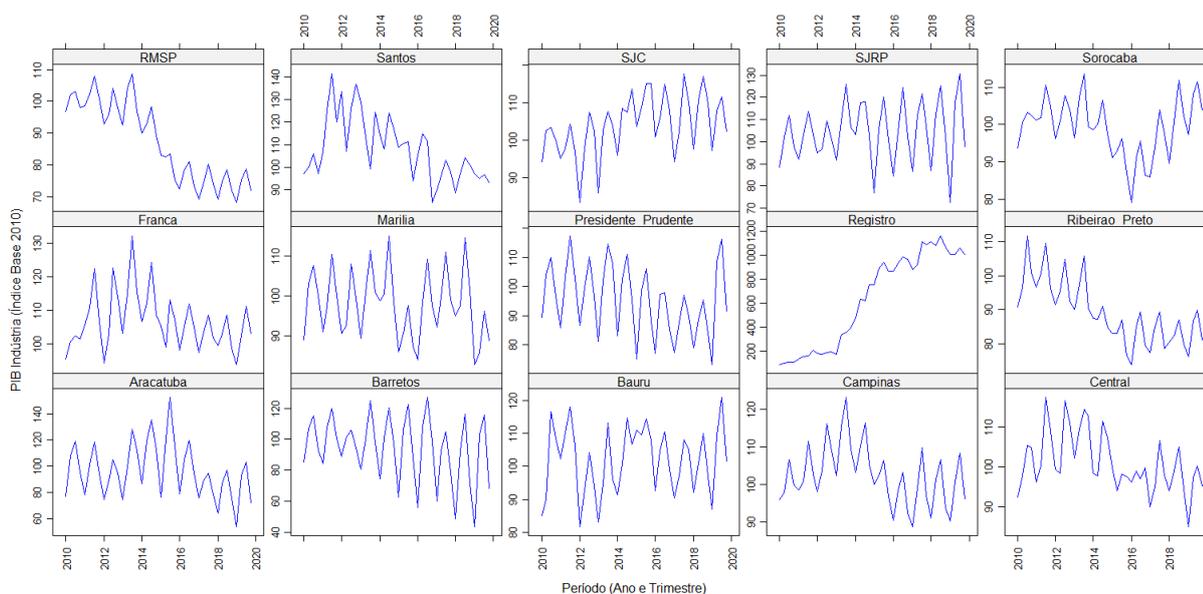


Figura 4 – Índice do PIB trimestral da indústria por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

No setor de serviços, destacam-se com os maiores valores médios do índice do PIB as RAs de Registro, Barretos, Marília, Aracatuba e Sorocaba

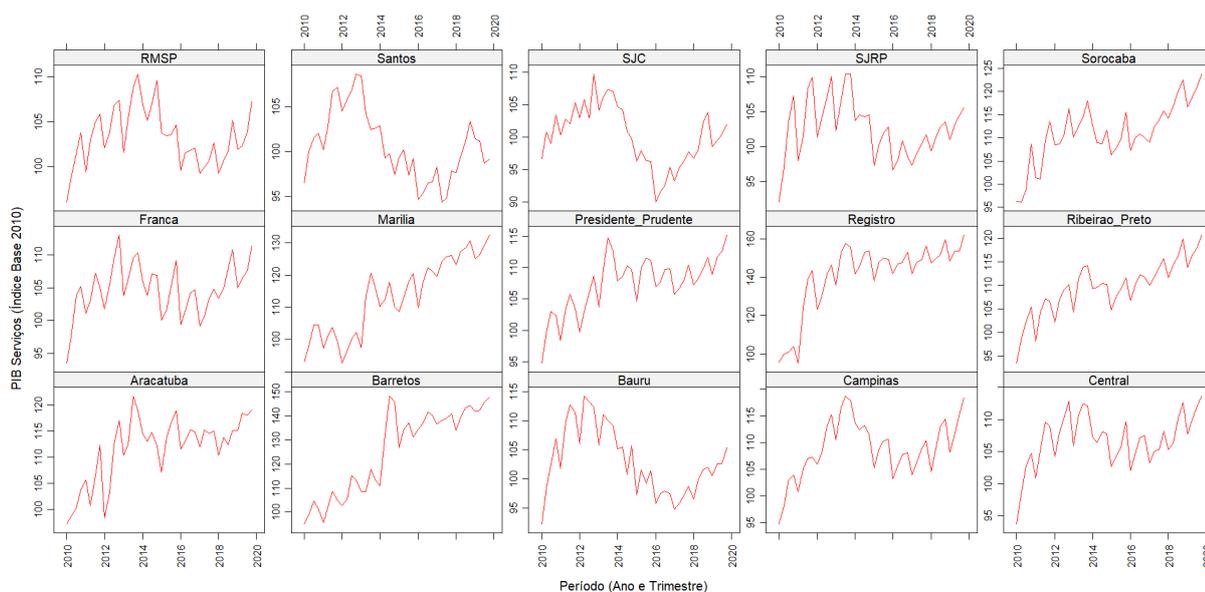


Figura 5 – Índice do PIB trimestral do setor de serviços por RA do estado de São Paulo no período de 2010 a 2019

4.2 Modelagem Estatística

A modelagem estatística foi conduzida com o objetivo de avaliar o impacto da precipitação (total de chuva e dias de chuva) sobre os índices do PIB dos setores de agricultura, indústria e serviços nas 15 RA do estado de São Paulo, no período de 2010 a 2019. Utilizando a abordagem de dados longitudinais em painel, foram estimados modelos distintos para cada setor, explorando as especificidades de suas respostas às variáveis climáticas.

4.2.1 Modelo para o Setor Agrícola

O modelo ajustado para o índice de PIB da Agricultura adota uma abordagem de efeitos fixos bidirecionais (*twoways*) no contexto de dados em painel. Essa escolha captura características específicas das RAs do estado de São Paulo e das condições temporais que influenciam o setor agrícola, além de observar os efeitos dinâmicos de variáveis climáticas ao longo do tempo.

Este modelo assume que as diferenças entre as regiões e os períodos podem ser capturadas por termos fixos, e que os impactos das variáveis independentes são consistentes em todas as regiões (RA) e ao longo do tempo (trimestres).

O modelo de efeitos fixos ajustado remove características não observadas que são específicas de cada RA (efeitos individuais) e de cada trimestre (efeito de tempo) antes de estimar os coeficientes das variáveis explicativas.

Essa abordagem elimina potenciais vieses causados por variáveis omitidas que não variam no tempo (como características geográficas e qualidade do solo) e por fatores constantes entre as regiões (como fatores macroeconômicos em determinado trimestre).

O ajuste bidirecional permite avaliar os impactos das variáveis climáticas sem confundir os efeitos locais (específicos da região) com choques globais ou sazonais.

Efeitos Bidirecionais:

Efeitos Regionais (individuais): O modelo controla as características intrínsecas de cada região, como diferenças estruturais, diversidade climática, tipo de solo, mecanização agrícola e culturas predominantes, através de termos fixos no modelo.

Efeitos Temporais: O modelo controla fatores globais ou sazonais, como choques climáticos, flutuações econômicas e mudanças nas políticas públicas que afetam todas as regiões de maneira similar, através de termos fixos no modelo.

A especificação do modelo incluiu como variáveis explicativas a precipitação total (PREC_Tot), o número de dias com chuva (Dias_Chuva), suas respectivas defasagens de segunda ordem e um termo de interação entre as variáveis PREC_Tot e Dias_Chuva. O modelo estimado pode ser representado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{PIB_Agro_Idx}_{it} = & \beta_1 \text{PREC_Tot}_{it} + \beta_2 \text{Dias_Chuva}_{it} \\ & + \beta_3 \text{PREC_Tot}_{it-2} + \beta_4 \text{Dias_Chuva}_{it-2} \\ & + \beta_5 (\text{PREC_Tot}_{it} \times \text{Dias_Chuva}_{it}) \\ & + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

Onde:

i representa a região administrativa

t representa o trimestre

α_i captura os efeitos fixos regionais

γ_t captura os efeitos fixos temporais

ε_{it} é o termo de erro

O modelo considera as seguintes variáveis explicativas:

- 1) PREC_Tot (precipitação total): Captura o efeito direto da quantidade total de chuva no trimestre sobre o PIB da Agricultura.
- 2) Dias_Chuva (número de dias com chuva): Mede o impacto da frequência das chuvas no mesmo período.
- 3) $\text{lag}(\text{PREC_Tot}, 2)$: Considera o efeito retardado (com atraso de dois trimestres) da precipitação total.
- 4) $\text{lag}(\text{Dias_Chuva}, 2)$: Avalia o impacto do número de dias chuvosos dois trimestres antes.
- 5) $\text{PREC_Tot} \times \text{Dias_Chuva}$: Interação entre precipitação total e frequência de dias chuvosos, permitindo avaliar o efeito combinado dessas variáveis.

A inclusão de *lags* (atrasos temporais) introduz uma dimensão dinâmica, que permite capturar os impactos tardios das condições climáticas sobre as culturas agrícolas nos trimestres subsequentes. Isso é particularmente relevante no setor agrícola, onde o efeito das chuvas pode se manifestar ao longo de outros períodos.

Os resultados da estimação revelaram coeficientes estatisticamente significativos ao nível de 0,1% para todas as variáveis incluídas no modelo, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados estatísticos do modelo de efeitos fixos estimado para o setor da agricultura

	PIB_Agro_Idx (Std. Error)
PREC_Tot	-0.220*** (0.028)
Dias_Chuva	-2.177*** (0.184)
lag(PREC_Tot, 2)	-0.049*** (0.012)
lag(Dias_Chuva, 2)	0.696*** (0.158)
PREC_Tot:Dias_Chuva	0.005*** (0.0005)
R ²	0.328
R ² Ajustado	0.254

Note: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

A análise dos coeficientes estimados permite identificar relações importantes entre as variáveis climáticas e o desempenho do setor agrícola. O coeficiente associado à precipitação total contemporânea (-0,22) indica que, mantidos os demais fatores constantes, um aumento de 1 mm na precipitação está associado a uma redução de aproximadamente 0,22 pontos no índice do PIB agrícola. A relação negativa sugere que chuvas excessivas podem prejudicar o desempenho agrícola devido a alagamentos ou outros efeitos adversos.

De forma similar, o coeficiente dos dias com chuva (-2,177) sugere um impacto negativo mais forte, onde cada dia adicional de chuva está associado a uma redução de cerca de 2,18 pontos no índice. Essa relação destaca que o aumento na frequência de dias chuvosos pode interferir no manejo agrícola, atrasando atividades como plantio e colheita.

Os efeitos defasados apresentam padrões distintos. A precipitação defasada em dois trimestres mantém um efeito negativo (-0,049), embora de magnitude menor que o de efeito atual. O impacto menor, mas ainda negativo, pode ser atribuído a

efeitos residuais de excesso de chuvas em trimestres anteriores, como degradação do solo.

Em contraste, o número de dias com chuva defasado apresenta um efeito positivo (0,696), sugerindo que uma melhor distribuição das chuvas em períodos anteriores pode beneficiar a produção agrícola atual, possivelmente através de seus efeitos na umidade do solo e no desenvolvimento das culturas.

Particularmente relevante é o efeito atual do termo de interação entre `PREC_Tot` e `Dias_Chuva` (0,005), que apresenta sinal positivo e significância estatística. Este resultado indica que o efeito negativo da precipitação é atenuado quando as chuvas são distribuídas ao longo de um maior número de dias, corroborando a hipótese de que chuvas bem distribuídas são menos prejudiciais à atividade agrícola que precipitações concentradas em períodos curtos.

A Figura 6 demonstra visualmente as relações de precipitação, dias de chuva e o desempenho do setor agrícola, tanto em efeitos contemporâneos quanto defasados. O gráfico mostra quatro curvas distintas que ilustram estas relações: duas para os efeitos contemporâneos (precipitação e dias de chuva) e duas para os efeitos defasados das mesmas variáveis.

A linha azul contínua, representando o efeito imediato da precipitação, exibe uma inclinação negativa acentuada, indicando que aumentos imediatos no volume de chuvas tendem a impactar negativamente o índice do PIB agrícola. Este efeito se intensifica com maiores volumes de precipitação, chegando a reduções superiores a 200 pontos no índice quando a precipitação atinge 1000 mm.

Em contrapartida, a linha azul tracejada, que representa o efeito defasado da precipitação, apresenta uma inclinação negativa mais suave, sugerindo que o impacto negativo das chuvas passadas é menos severo que o efeito contemporâneo. Esta diferença na inclinação das curvas sugere um processo de adaptação e recuperação do setor agrícola aos eventos de precipitação intensa.

As linhas verdes demonstram os efeitos dos dias de chuva. A linha verde contínua (efeito imediato) mostra uma inclinação negativa moderada, enquanto a linha verde tracejada (efeito defasado) apresenta uma inclinação positiva. Esta divergência nas inclinações confirma que, embora um maior número de dias chuvosos possa prejudicar a produção no curto prazo, seus efeitos defasados são benéficos para a atividade agrícola, possivelmente devido à melhor distribuição da umidade no solo e condições mais favoráveis para o desenvolvimento das culturas.

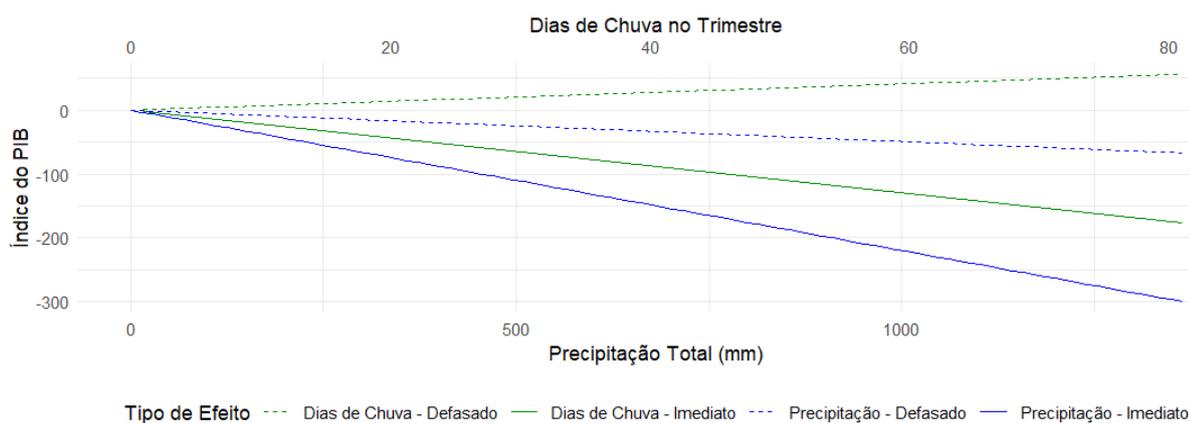


Figura 6 – Efeitos atuais e defasados no índice do PIB da agricultura

A visualização da superfície na Figura 7 oferece uma perspectiva da interação entre precipitação total, dias de chuva e seu impacto no índice do PIB agrícola. O gradiente de cores, variando do roxo/azul escuro (valores mais baixos) ao amarelo (valores mais altos), em conjunto com a topografia da superfície, revela padrões complexos desta interação.

A superfície apresenta uma inclinação significativa tanto no eixo da precipitação total (mm) quanto no eixo dos dias de chuva, evidenciando que ambas as variáveis têm impacto relevante no índice do PIB agrícola.

A região de máximo (coloração verde e amarelada) está localizada em condições de alta precipitação total com muitos dias de chuva, refletindo que chuvas bem distribuídas e em volume adequado, são os mais favoráveis para o desempenho do setor agrícola.

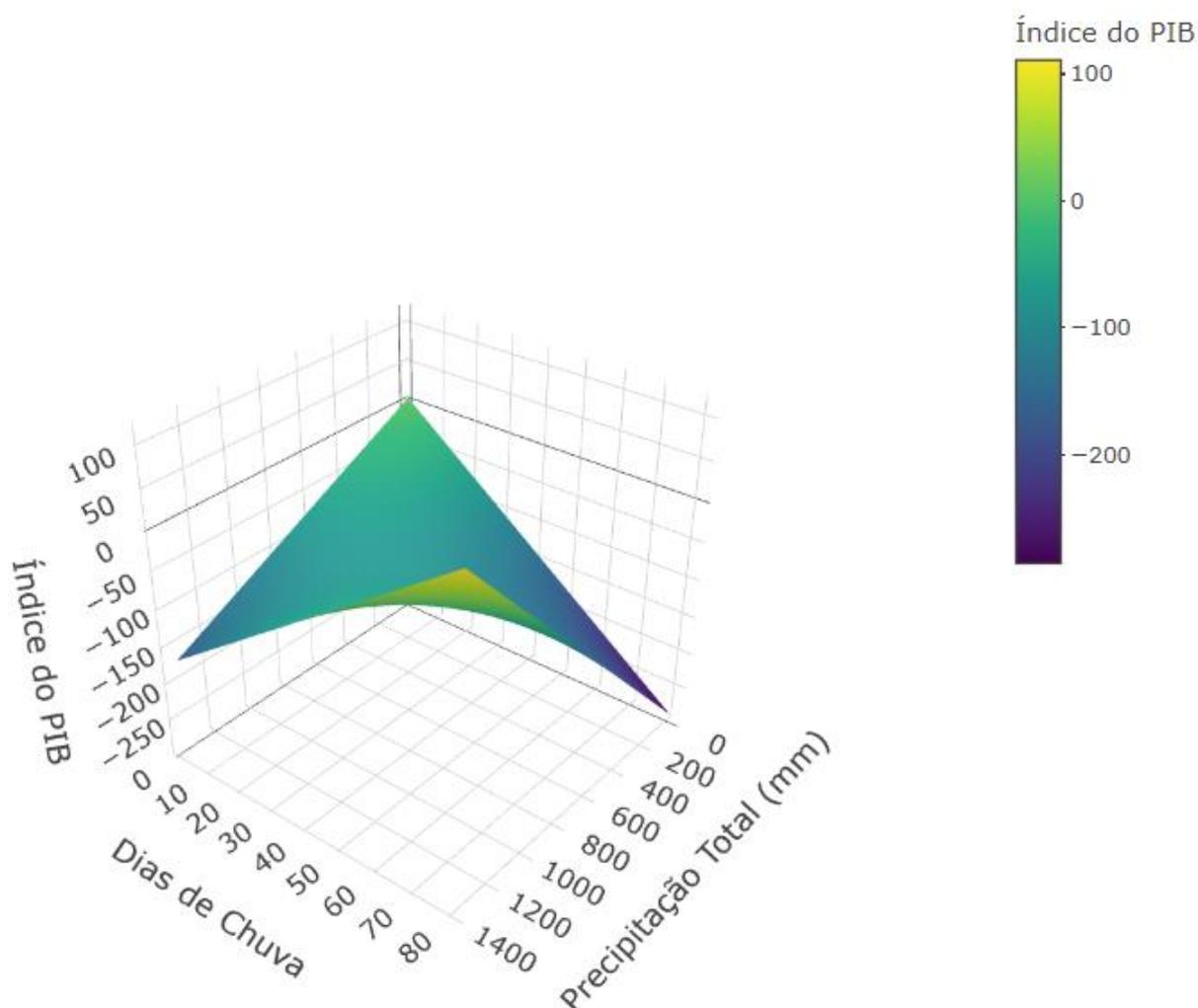


Figura 7 – Efeito combinado de precipitação e dias de chuva no PIB agrícola

Por outro lado, a região de mínimo (coloração azul escura/roxa) é quando há baixa precipitação total associada a um elevado número de dias de chuva. Este cenário caracteriza chuvas de baixa intensidade e prolongadas resultando em um impacto severo negativo no PIB agrícola.

Esta visualização tridimensional demonstra que o impacto no setor agrícola não depende apenas do total de chuvas, mas também da forma como essas chuvas ocorrem ao longo do tempo, evidenciando que regimes equilibrados são essenciais para maximizar o desempenho econômico.

Ao avaliar quantitativamente o poder explicativo do modelo. O coeficiente de determinação (R^2) de 0,328 indica que aproximadamente 32,8% da variação no índice

do PIB agrícola é explicada pelas variáveis climáticas incluídas no modelo. Este valor é satisfatório, dado que o desempenho do setor agrícola é influenciado por outros fatores além das condições climáticas, como preços de commodities, políticas agrícolas e condições de mercado.

4.2.2 Modelo para o Setor Industrial

O modelo ajustado para o setor industrial foi conduzido através de um modelo com efeitos aleatórios bidirecionais (*twoways*), configurado para capturar tanto as características regionais quanto os fatores temporais que influenciam o setor industrial.

O modelo incorporou efeitos atuais e defasados das variáveis climáticas, incluindo um termo quadrático para capturar possíveis não linearidades na relação entre dias de chuva e desempenho industrial.

Esse modelo de efeitos aleatórios bidirecional permite capturar características regionais e temporais, enquanto permite incluir variáveis que não variam no tempo. A abordagem de efeitos aleatórios é justificada pela natureza do setor industrial, que é fortemente influenciado por fatores locais (infraestrutura) e globais (mercados internacionais). Neste sentido, os efeitos não observados variam aleatoriamente entre as regiões e ao longo do tempo.

Os efeitos bidirecionais permitem separar as influências regionais (exemplo, características da infraestrutura industrial) das temporais (ex., crises econômicas globais), evitando a confusão entre esses fatores. Efeitos Aleatórios:

Efeitos Regionais (individuais): A variação entre as regiões é modelada como um componente aleatório, capturando características não observadas específicas de cada região.

Efeitos Temporais (trimestre): Fatores que variam ao longo do tempo, mas são constantes entre regiões, também são tratados como aleatórios, como políticas econômicas ou flutuações na demanda.

A especificação do modelo incluiu como variáveis explicativas a precipitação total (PREC_Tot), o número de dias com chuva (Dias_Chuva), um termo quadrático para dias com chuva, e suas respectivas defasagens de segunda ordem. O modelo estimado pode ser representado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{PIB_Ind_Idx}_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \text{PREC_Tot}_{it} + \beta_2 \text{Dias_Chuva}_{it} \\ & + \beta_3 (\text{Dias_Chuva}_{it})^2 + \beta_4 \text{PREC_Tot}_{it-2} + \beta_5 \text{Dias_Chuva}_{it-2} \\ & + (\mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}) \end{aligned}$$

Onde:

i representa a região administrativa

t representa o trimestre

μ_i representa os efeitos aleatórios regionais

λ_t representa os efeitos aleatórios temporais

ε_{it} é o termo de erro

Os resultados da estimação apresentaram coeficientes estatisticamente significativos ao nível de 0,1% para todas as variáveis incluídas no modelo, como demonstrado na Tabela 4.

A análise dos coeficientes estimados revela relações complexas entre as variáveis climáticas e o desempenho do setor industrial. O intercepto (96,502) estabelece o nível base do índice industrial, representando o valor médio do índice de PIB da Indústria quando todas as variáveis explicativas são zero.

A precipitação total (-0,167) apresenta efeito negativo, onde cada milímetro adicional de chuva está associado a uma redução de aproximadamente 0,17 pontos no índice do PIB. Esse impacto negativo pode refletir problemas como alagamentos e interrupções no transporte ou produção industrial.

Tabela 4 – Resultados estatísticos do modelo de efeitos aleatórios estimado para o setor da indústria

	PIB_Ind_Idx (Std. Error)
PREC_Tot	-0.167*** (0.0004)
Dias_Chuva	-0.204*** (0.012)
I(Dias_Chuva2)	0.037*** (0.0001)
lag(PREC_Tot, 2)	-0.106*** (0.0004)
lag(Dias_Chuva, 2)	2.222*** (0.005)
Constante	96.502*** (0.365)
R ²	0.260
R ² Ajustado	0.254
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

O efeito dos dias com chuva (-0,204) é negativo. A frequência de dias chuvosos pode levar a atrasos logísticos e impactos no transporte de bens e insumos. O termo quadrático dos dias com chuva (0,037) é positivo, indicando uma relação não linear que atenua o efeito negativo em níveis mais elevados.

A precipitação defasada (-0,106) mantém efeito negativo, embora menor que a precipitação atual. Os dias com chuva defasados (2,222) apresentam efeito positivo substancial, sugerindo benefícios de condições climáticas passadas.

A Figura 8 demonstra os efeitos atuais e defasados da chuva no setor industrial e revela uma complexa interação entre as variáveis climáticas e o desempenho econômico. A análise separada dos efeitos permite observar cinco componentes distintos de impacto, evidenciando a natureza desta relação.

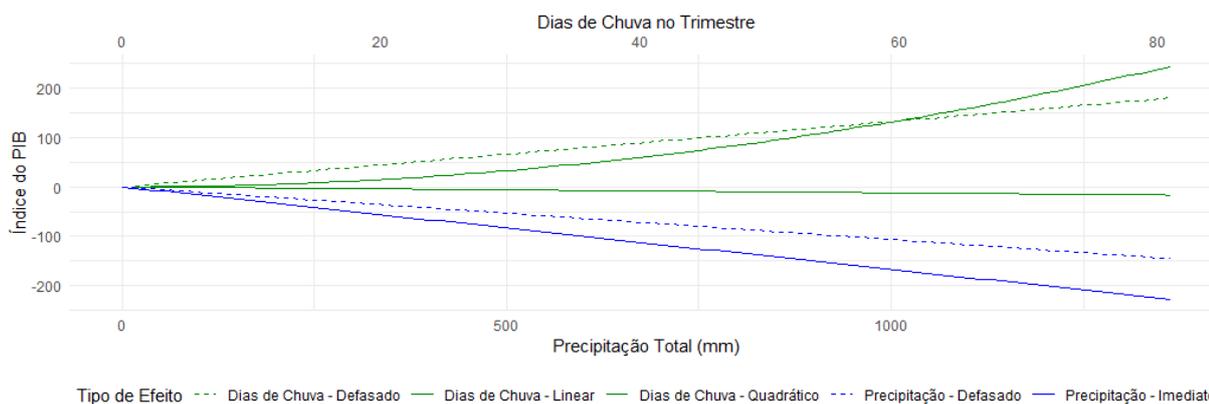


Figura 8 – Efeitos atuais e defasados no índice do PIB da indústria

O efeito imediato da precipitação total, representado pela linha azul contínua, demonstra uma relação negativa com o índice do PIB industrial, indicando que volumes maiores de chuva tendem a impactar negativamente o desempenho imediato do setor. Este efeito é complementado por seu componente defasado (linha azul tracejada), que também apresenta inclinação negativa, sugerindo uma persistência do impacto adverso da precipitação ao longo do tempo.

Particularmente interessante é a decomposição do efeito dos dias de chuva em seus componentes linear e quadrático. O efeito linear (linha verde contínua) apresenta inclinação negativa, indicando um impacto adverso inicial do aumento no número de dias chuvosos. Contudo, o efeito quadrático (segunda linha verde contínua) mostra uma curvatura positiva, sugerindo que este impacto negativo tende a ser atenuado em níveis mais elevados de dias com chuva, possivelmente refletindo mecanismos de adaptação do setor.

O efeito defasado dos dias de chuva (linha verde tracejada) exibe uma inclinação positiva, contrastando com os efeitos atuais. Esta característica sugere que, embora o setor industrial possa sofrer impactos negativos imediatos das condições climáticas adversas, existe uma capacidade de recuperação e possível adaptação no médio prazo.

Esta análise dos efeitos climáticos revela a complexidade da relação entre condições meteorológicas e atividade industrial, destacando a importância de

considerar tanto os impactos imediatos quanto os efeitos defasados, bem como as relações não-lineares presentes nesta dinâmica.

A Figura 9 revela padrões na interação entre precipitação total e dias de chuva sobre o índice do PIB industrial. A visualização evidencia uma relação não-linear entre estas variáveis, particularmente devido ao termo quadrático dos dias de chuva presente no modelo. Esta não-linearidade se manifesta na distribuição assimétrica das cores ao longo do eixo vertical do gráfico.

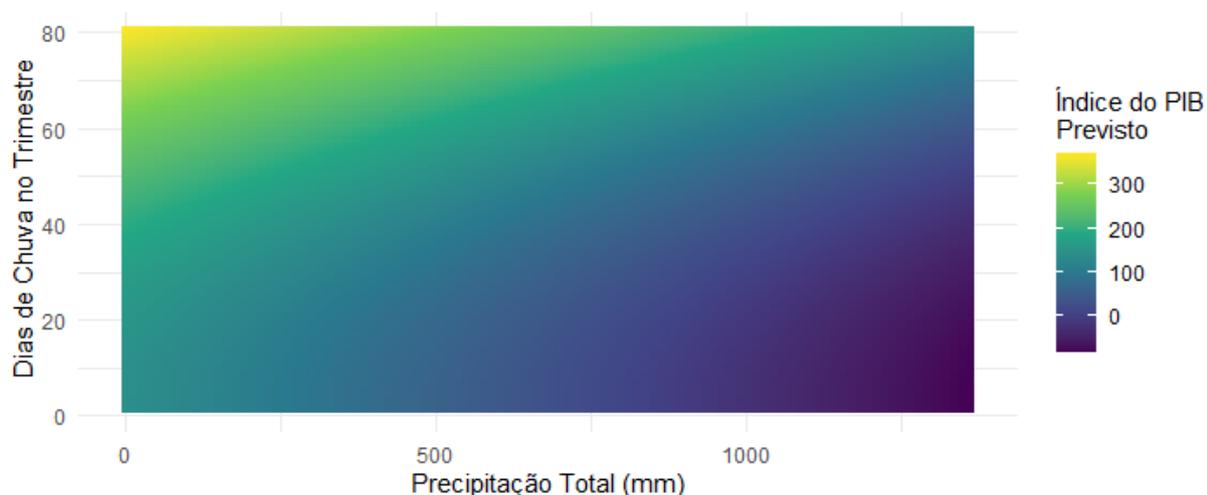


Figura 9 – Efeito combinado de precipitação e dias de chuva no PIB da indústria

A região de máximo do índice do PIB (tonalidades mais claras) concentra-se na área que combina baixa precipitação total com número moderado de dias de chuva, sugerindo que o setor industrial se beneficia de uma distribuição mais equilibrada das chuvas, desde que o volume total não seja excessivo.

Em contraste, as regiões com valores mais baixos do índice (tonalidades mais escuras) são observadas em condições de alta precipitação total, independentemente do número de dias de chuva, indicando que volumes elevados de precipitação são consistentemente prejudiciais ao desempenho do setor.

Esta complexidade nas relações observadas é consistente com o coeficiente de determinação (R^2) de 0,260, que indica que aproximadamente 26% da variação no índice industrial é explicada pelas variáveis climáticas. Este valor moderado de R^2

sugere que, embora as condições climáticas sejam um fator relevante para o desempenho do setor industrial, outros elementos não climáticos também exercem influência significativa sobre sua dinâmica.

4.2.3 Modelo para o Setor de Serviços

O setor de serviços também foi modelado utilizando efeitos aleatórios bidirecionais. Assim como o modelo do setor da indústria, essa abordagem também permite capturar tanto as características regionais quanto os fatores temporais que influenciam o setor de serviços. O modelo incorporou efeitos atuais e defasados das variáveis de chuva, incluindo um termo de interação para capturar efeitos combinados da precipitação e dias de chuva. O modelo também utilizou efeitos individuais e temporais. O modelo estimado pode ser representado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{PIB_Serv_Idx}_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \text{PREC_Tot}_{it} + \beta_2 \text{Dias_Chuva}_{it} \\ & + \beta_3 \text{PREC_Tot}_{it-2} + \beta_4 \text{Dias_Chuva}_{it-2} \\ & + \beta_5 (\text{PREC_Tot}_{it} \times \text{Dias_Chuva}_{it}) \\ & + (\mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}) \end{aligned}$$

Onde:

i representa a região administrativa

t representa o trimestre

μ_i representa os efeitos aleatórios regionais

λ_t representa os efeitos aleatórios temporais

ε_{it} é o termo de erro

Os resultados da estimação apresentaram coeficientes estatisticamente significativos ao nível de 0,1% para todas as variáveis incluídas no modelo, como demonstrado na Tabela 5.

A análise dos coeficientes estimados revela relações de menor intensidade entre as variáveis climáticas e o desempenho do setor de serviços. O intercepto (107,897) estabelece um nível base elevado do índice. O alto valor reflete a base robusta do setor de serviços no estado de São Paulo.

Tabela 5 – Resultados estatísticos do modelo de efeitos aleatórios estimado para o setor de serviços

	PIB_Serv_Idx (Std. Error)
PREC_Tot	0.003*** (0.001)
Dias_Chuva	0.026*** (0.006)
lag(PREC_Tot, 2)	-0.004*** (0.0004)
lag(Dias_Chuva, 2)	0.099*** (0.006)
PREC_Tot:Dias_Chuva	-0.0001*** (0.00002)
Constant	107.897*** (0.523)
R ²	0.055
R ² Ajustado	0.047
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

A precipitação total (0,003) tem efeito positivo pequeno, mas significativo. Já os dias com chuva (0,026) tem impacto positivo moderado. Esses resultados positivos podem estar relacionados à dependência dos serviços de transporte ou logística que se beneficiam de melhores condições hídricas.

A precipitação defasada (-0,004) tem efeito negativo pequeno enquanto os dias com chuva defasados (0,099) tem efeito positivo mais forte. O efeito negativa da precipitação passada pode estar relacionado com danos à infraestrutura. E o efeito defasado positivo dos dias de chuva podem ter contribuído para o reabastecimento de estoques ou infraestrutura que beneficia o setor de serviços.

A variável de interação entre precipitação total e dias de chuva foi significativa e negativa (-0,0001), sugerindo que embora as chuvas isoladas possam ter um impacto positivo, a combinação de precipitação alta e muitos dias chuvosos pode ser prejudicial para o setor de serviços.

A Figura 10 que demonstra os efeitos atuais e defasados da chuva sobre o PIB do setor de serviços revela um padrão distinto quando comparado aos setores agrícola e industrial. A análise visual evidencia uma sensibilidade mais moderada do setor às variáveis climáticas, com mudanças menos profundas nos índices.

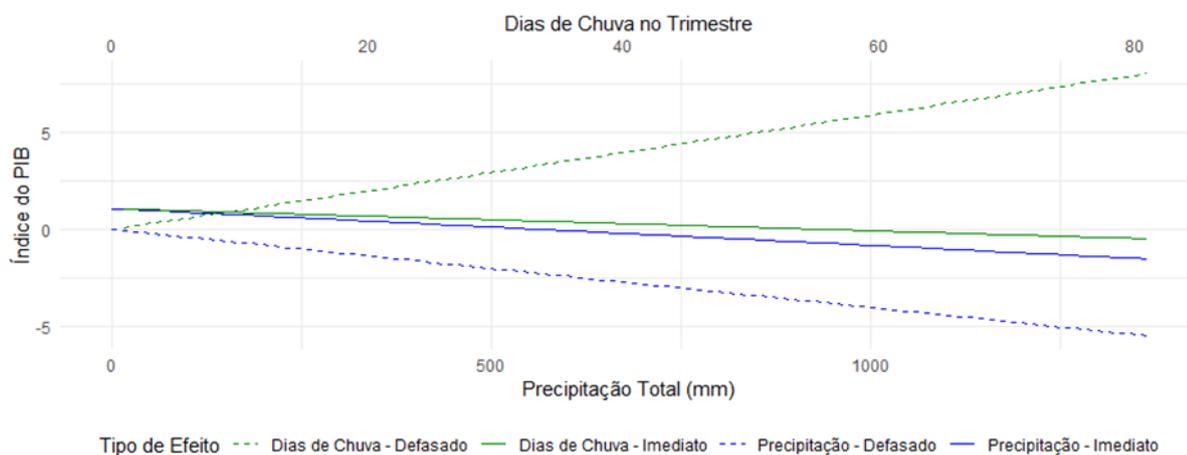


Figura 10 – Efeitos atuais e defasados no índice do PIB de serviços

O aspecto mais notável é o comportamento divergente entre os efeitos defasados dos dias de chuva e da precipitação total. A linha verde tracejada, que representa o efeito defasado dos dias de chuva, apresenta uma inclinação positiva, indicando que períodos anteriores com maior número de dias chuvosos contribuem positivamente para o desempenho do setor de serviços.

Este padrão sugere uma possível adaptação do setor à distribuição temporal das chuvas, onde a regularidade climática em períodos anteriores pode favorecer o planejamento e a execução das atividades de serviços.

Em contraste, a linha azul tracejada, que representa o efeito defasado da precipitação total, exibe uma tendência negativa, embora menos acentuada que os setores anteriormente analisados. Esta relação indica que volumes elevados de precipitação em períodos anteriores podem impactar negativamente o setor, sugerindo efeitos persistentes na infraestrutura urbana e no comportamento dos consumidores.

Os efeitos imediatos, representados pelas linhas contínuas, mostram uma sensibilidade ainda menor, com inclinações suaves tanto para precipitação total quanto para dias de chuva. Esta característica sugere que o setor de serviços possui maior resiliência a condições climáticas imediatas, possivelmente devido à sua natureza diversificada e menor dependência direta de condições meteorológicas quando comparado aos setores agrícola e industrial.

Esta análise indica a capacidade de adaptação do setor de serviços às condições climáticas, bem como sua menor vulnerabilidade a variações meteorológicas imediatas, características que contribuem para sua estabilidade relativa frente a fatores climáticos.

A Figura 11 apresenta um padrão de variação do índice do PIB que evidencia a natureza distinta deste setor em relação aos demais quando considerada sua resposta a condições climáticas.

A visualização revela uma gradação mais suave nas transições de cores, indicando uma menor sensibilidade do setor às variações conjuntas de precipitação e dias de chuva.

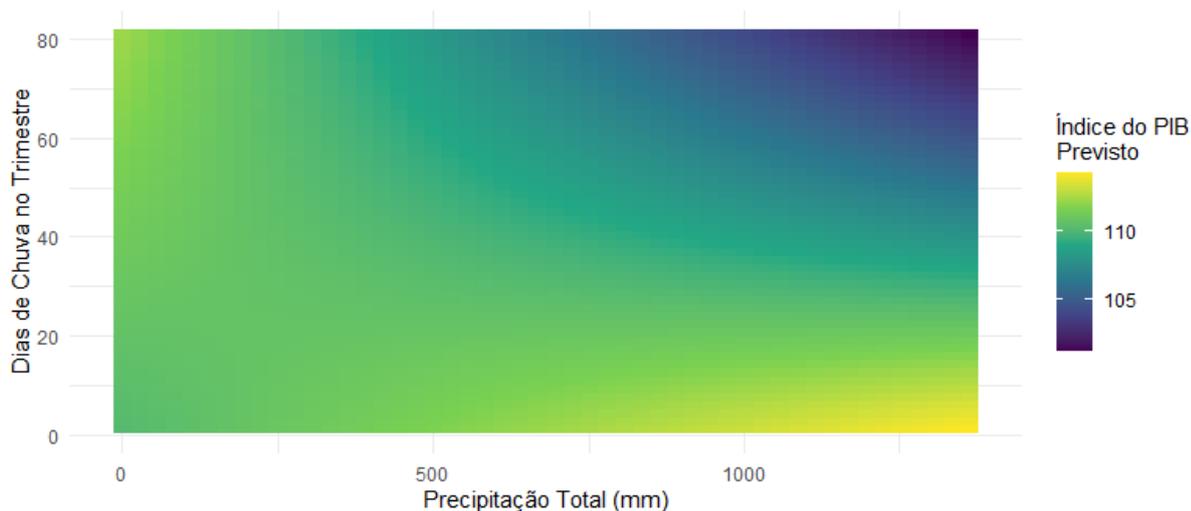


Figura 11 – Efeito combinado de precipitação e dias de chuva no PIB de serviços

A distribuição das cores se manifesta de forma mais moderada em comparação aos setores agrícola e industrial. Esta característica é consistente com a natureza

diversificada do setor de serviços, que engloba atividades com diferentes graus de exposição às condições climáticas.

Observa-se que as regiões de máximo e mínimo no índice previsto do PIB apresentam contrastes menos acentuados, indicando que o setor de serviços possui maior capacidade de manutenção de suas atividades mesmo em condições climáticas variadas. Este padrão pode ser atribuído à menor dependência e adaptação do setor de serviços em relação as condições meteorológicas.

O ajuste do modelo para o setor de serviços reforça essa observação. O baixo R^2 (0,055) sugere que as variáveis climáticas têm um poder explicativo limitado sobre o índice do PIB do setor de serviços, diferentemente dos setores agrícola e industrial, mais suscetíveis às condições meteorológicas avaliadas no estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou o impacto da relação entre condições climáticas, especificamente precipitação total e dias com chuva, e o desempenho econômico setorial do estado de São Paulo, utilizando dados trimestrais de 15 Regiões Administrativas no período de 2010 a 2019. Através de uma abordagem estatística baseada em dados longitudinais em painel, foram desenvolvidos modelos específicos para os setores agrícola, industrial e de serviços, revelando padrões distintos de sensibilidade às variáveis climáticas.

No setor agrícola, os resultados evidenciaram uma forte interação entre o volume de precipitação e sua distribuição temporal. O modelo explicou aproximadamente 32,8% da variação no índice do PIB agrícola e revelou que chuvas intensas distribuídas ao longo de muitos dias são benéficas ao setor, enquanto períodos prolongados de chuvas fracas (caracterizados por muitos dias de chuva com baixo volume total de precipitação) são particularmente prejudiciais ao desempenho do setor.

A presença do termo de interação no modelo, aliado às representações gráficas tridimensionais, destacou que a combinação entre alta precipitação total e elevado número de dias de chuva maximiza o PIB agrícola, enquanto baixa precipitação total com muitos dias de chuva, representa o cenário mais prejudicial.

O setor industrial apresentou uma dinâmica distinta, caracterizada por uma relação não-linear com os dias de chuva, evidenciada pela presença do termo quadrático no modelo. Com um poder explicativo de 26%, o modelo industrial revelou que o setor responde de forma diferenciada aos eventos climáticos, com efeitos que variam conforme a intensidade e duração das chuvas.

A análise gráfica demonstrou que o setor é particularmente sensível a volumes elevados de precipitação, independentemente de sua distribuição temporal, sugerindo que eventos de chuva intensa podem impactar significativamente a atividade

industrial, possivelmente através de interferências em cadeias logísticas e processos produtivos.

O setor de serviços demonstrou a menor sensibilidade às variáveis climáticas, com o modelo explicando aproximadamente 5,5% da variação no índice do PIB setorial. Esta menor dependência é consistente com a natureza das atividades de serviços, menos suscetíveis a condições meteorológicas. No entanto, a presença de um termo de interação no modelo indica que, mesmo neste setor, existe uma relação não-linear entre precipitação e dias de chuva, ainda que de magnitude significativamente menor que nos outros setores.

Essas conclusões destacam a necessidade de políticas públicas regionais que considerem as especificidades setoriais e espaciais do impacto climático. A implementação de estratégias de adaptação e mitigação em períodos de vulnerabilidade climática, pode contribuir para minimizar os efeitos negativos da precipitação sobre a economia paulista.

Além disso, o estudo reforça a relevância de se trabalhar com dados longitudinais em painel em análises econômicas e climáticas, dada a sua capacidade de capturar a diferença regional e temporal. Essa abordagem metodológica foi essencial para identificar tanto os efeitos imediatos quanto os defasados das variáveis climáticas sobre o desempenho econômico.

Embora o foco deste trabalho tenha sido o estado de São Paulo, a metodologia utilizada pode ser replicada em outros contextos regionais ou nacionais, desde que haja disponibilidade de dados em nível desagregado. Estudos futuros poderiam explorar a inclusão de outras variáveis climáticas, como temperatura e umidade relativa, bem como ampliar o horizonte temporal para avaliar os impactos de mudanças climáticas. Esses esforços podem contribuir significativamente para a formulação de políticas públicas mais eficazes e adaptativas frente aos desafios climáticos.

REFERÊNCIAS

BALTAGI, B. H. *Econometric Analysis of Panel Data*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2021.

CETESB. *Qualidade do ar no estado de São Paulo 2022*. São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2023/07/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2022.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CROISSANT, Y.; MILLO, G. A plm Package for Panel Data Econometrics in R. 2024. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/plm/vignettes/A_plmPackage.html. Acesso em: 04 out. 2024.

FUNDAÇÃO SEADE. Esclarecimento sobre o PIB industrial da Região de Registro. [S.l.], 2024. Informação fornecida via comunicação institucional em 10 dez. 2024.

HADDAD, E. A. et al. Impactos Econômicos Das Mudanças Climáticas No Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE A ECONOMIA MINEIRA, 14., 2010, Diamantina. *Anais [...]*. Belo Horizonte: CEDEPLAR/UFMG, 2010. Disponível em: <https://ideas.repec.org/h/cdp/diam10/047.html>. Acesso em: 05 maio. 2024.

HENSELER, M.; SCHUMACHER, I. The impact of weather on economic growth and its production factors. *Climatic Change*, v. 154, n. 3, p. 417-433, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. PIB dos municípios: ano de referência 2010. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. (Relatórios metodológicos, v. 29). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv97483.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produto Interno Bruto. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 18 maio. 2024.

KAHN, M. E. et al. Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Economics*, v. 104, 105624, 2021.

KOTZ, M.; LEVERMANN, A.; WENZ, L. The effect of rainfall changes on economic production. *Nature*, v. 601, n. 7892, p. 223-227, jan. 2022.

LIANG, X. Z. Extreme rainfall slows the global economy. *Nature*, v. 601, n. 7892, p. 193-194, jan. 2022.

LIMA, G. F. C.; LAYRARGUES, P. P. Mudanças climáticas, educação e meio ambiente: para além do Conservadorismo Dinâmico. *Educar em Revista*, Curitiba, n. spe3, p. 73-88, 2014.

MARTINELLI, M. A. Clima do estado de São Paulo. *Confins*, n. 8, 2010. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/6348>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MICROSOFT CORPORATION. *Microsoft Excel* [365]. Versão 2023. Redmond: Microsoft Corporation, 2023. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>. Acesso em: 19 set. 2024.

NOBRE, C. A. et al. *Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo Relatório Final*. São Paulo: INPE/UNICAMP, 2011.

RSTUDIO TEAM. *RStudio: Integrated Development Environment for R*. Boston: RStudio PBC, 2023. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>. Acesso em: 04 out. 2024.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Desenvolvimento Econômico. *Plano de Desenvolvimento Econômico 2022-2040*. São Paulo: Secretaria de Desenvolvimento Econômico, 2022. Disponível em: <https://www.desenvolvimentoeconomico.sp.gov.br/wp-content/uploads/2022/10/pde-plano-de-desenvolvimento-economico-2022-2040.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.