

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
CENTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISAS EM CONTROLADORIA E
CONTABILIDADE

DANIEL EDUARDO DE OLIVEIRA

**DERIVATIVOS CLIMÁTICOS NO BRASIL: ANÁLISE DA EFETIVIDADE DA
ESTRATÉGIA DE *HEDGE* NAS CULTURAS DE SOJA, MILHO E CAFÉ.**

Belo Horizonte

2023

DANIEL EDUARDO DE OLIVEIRA

**DERIVATIVOS CLIMÁTICOS NO BRASIL: ANÁLISE DA EFETIVIDADE DA
ESTRATÉGIA DE HEDGE NAS CULTURAS DE SOJA, MILHO E CAFÉ.**

Dissertação apresentada ao Centro de Pós-graduação e Pesquisas em Controladoria e Contabilidade da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Controladoria e Contabilidade.

Linha de pesquisa: Controladoria e Finanças.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Lima Pinheiro.

Belo Horizonte
2023

Ficha Catalográfica

O48d
2023

Oliveira, Daniel Eduardo de.

Derivativos climáticos no Brasil [manuscrito] : análise da efetividade da estratégia de hedge nas culturas de soja, milho e café / Daniel Eduardo de Oliveira. – 2023.

81 f.: il.

Orientador: Juliano Lima Pinheiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Controladoria e Contabilidade.

Inclui bibliografia.

1. Agroindústria – Teses. 2. Produtos agrícolas – Teses. 3. Agricultura – Brasil – Teses. I. Pinheiro, Juliano Lima. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Controladoria e Contabilidade. III. Título.

CDD: 338.1

Elaborado por Leonardo Vasconcelos Renault CRB-6/2211
Biblioteca da FACE/UFMG. – LVR/157/2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONTROLADORIA E CONTABILIDADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

Derivativos Climáticos no Brasil: Análise da Efetividade da Estratégia de Hedge nas Culturas de Soja, Milho e Café.

DANIEL EDUARDO DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO de Mestrado defendida e aprovada, no dia cinco de dezembro de dois mil e vinte e três, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Controladoria e Contabilidade da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Juliano Lima Pinheiro - Orientador

UFMG

Renata Turola Takamatsu

UFMG

Felipe Dias Paiva

CEFET/MG

Belo Horizonte, 05 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Juliano Lima Pinheiro**, Professor do Magistério Superior, em 06/12/2023, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Turola Takamatsu**, Coordenador(a) de curso de pós-graduação, em 11/12/2023, às 21:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Dias Paiva**, Usuário Externo, em 15/12/2023, às 08:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 2871769 e o código CRC BA3EFA66.

*Aos meus pais, Ilma e Laci, meus
irmãos, Michelle, Camila e Rafael.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças em todos os momentos difíceis (não foram poucos). Agradeço aos meus pais, Ilma e Laci, por sempre acreditarem que eu poderia mais, pelos sacrifícios que fizeram por mim, por serem produtores rurais e me mostrarem que a agricultura é o setor que constrói mundos e oportunidades. À minha mãe, Ilma, que esteve comigo em todos os momentos importantes, difíceis, tristes e alegres, sempre disposta a ouvir meus desabafos e receios, dando-me forças para prosseguir. Agradeço aos meus irmãos, que sempre acreditam que posso mais, que me veem com os melhores olhos e que ficam felizes por cada pequena conquista que tenho.

Agradeço ao Jeferson, por acreditar, apoiar, motivar, estar ao meu lado e acompanhar cada passo dado, do início ao fim, em minha trajetória no mestrado. Obrigado por me escutar, nossas conversas, meus desabafos, minhas euforias, meu mau humor, meu bom humor e minhas ansiedades. A sua companhia durante os períodos de tensão, alegria e medos foram imprescindíveis para que eu chegasse aonde estou. Agradeço por sempre acreditar que consigo, até mesmo quando eu acho que não. Essa dissertação também é para você!

Ao meu orientador, Dr. Juliano Lima Pinheiro, que participou da minha banca de seleção e foi um alívio em meio à tensão. Agradeço por comprar minhas ideias e me ajudar a colocá-las em prática. Antes de iniciar minha primeira experiência como professor na graduação, tivemos uma conversa que fez toda a diferença em cada aula que dei, fui genuíno e me inspirei no grande professor que você é. O processo ficou mais leve com você me orientando.

Agradeço ao professor, Dr. Felipe Dias Paiva, por aceitar fazer parte da banca de avaliação e ajudar com críticas construtivas. Agradeço, em especial, à Dr.^a Renata Turola Takamatsu, que foi minha professora na primeira e na última disciplina que cursei durante o mestrado. As suas contribuições para minha formação foram enriquecedoras, a forma como eu pesquiso hoje se deve à grande pesquisadora que você é, e que me faz querer ser.

Agradeço aos meus gerentes, Lucilla Abdala Miranda, responsável por plantar a semente do conhecimento em meu coração. As nossas conversas foram a virada de chave de que eu precisava para entrar no mundo do conhecimento. Obrigado por acreditar em mim. Alan Dornas, que, de gerente, virou amigo, figura de homem na qual se inspirar. Seu caráter e ética profissional muito me ensinaram. Bianca de Abreu Miranda, sua força e liderança lhe colocam

onde está. Agradeço imensamente por apoiar esse último ano no mestrado. Palavras escritas aqui não conseguiriam descrever a gratidão que tenho por sua paciência e pelo compromisso para que eu terminasse o mestrado.

Agradeço aos professores e funcionários do CEPCON, em especial, à professora Dr.^a Laura Edith Taboada Pinheiro e ao professor Dr. Pueri do Carmo Mario, cujo ensinamentos e trocas em aulas, me fizeram ter dois artigos publicados, frutos das disciplinas de Auditoria Contábil e Controladoria Avançada.

Aos colegas e amigos do mestrado, em especial, aos meus amigos que entraram comigo e permaneceram até o fim, Alexandro, Jayne, Mateus e Giuliana. Obrigado pelas trocas, pelo aprendizado, pela empatia e pela amizade. Vocês são profissionais e seres humanos incríveis! Obrigado por tudo.

Por fim, agradeço aos meus amigos e familiares. Welida Gonçalves, Cintia Cota, Gabriela Dias, Cris Maria, Marina Marçal, Leticia Dias, Rubia Caroline, Débora Biondini, Michele Sena, Jonata Batista e Lorena Coimbra, este trabalho é para todos vocês, que sempre estiveram me apoiando, acreditando e torcendo por mim.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

(Isaac Newton, 1675)

RESUMO

Oliveira, D. E. (2023). *Precificação e efetividade de hedge em derivativos climáticos para gerenciar riscos no agronegócio brasileiro*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

O objetivo do presente estudo consistiu em analisar se os derivativos climáticos podem ser aplicados em diferentes regiões brasileiras, considerando a efetividade de *hedge* e demonstrar o modelo mais adequado para a precificação ao elaborar os contratos de derivativos climáticos no Brasil. Para tanto, realizou-se uma pesquisa descritiva, com abordagem quantitativa. A amostra da pesquisa compreendeu as quatro maiores cidades produtoras de café, milho e soja no Brasil, entre o período de 2000 a 2021. Utilizou-se de regressão e modelo ARIMA para estimação da produção nos anos de 2022 e 2023 e, na estimação, todas as cidades e culturas foram significativas a 95%. Quanto aos dados de temperatura, a acomodação diminuiu a variância das temperaturas, resultando em uma distribuição mais homogênea. O teste de Durbin Watson demonstrou ausência de autocorrelação. Após a estimação da produção, foi realizada a precificação do derivativo climático. Primeiro, foi feita a precificação utilizando-se a simulação de Monte Carlo, sendo possível notar que, para todas as cidades analisadas, obtiveram-se valores relevantes apenas para o *Call* (compra) baseado no *Cooling Degree Days* (CDD). O segundo método utilizado para precificação foi o *Burn Analysis*, cujos resultados mostram um valor médio de *Call* para todas estações e culturas. Entretanto, na cidade de Brejetuba, no estado do Espírito Santo, foi possível notar um preço de *Call* (10,83) referente ao CDD maior que as demais. Isso significa que o produtor tem uma necessidade maior de graus para resfriamento na produção de café. Quanto à precificação com base no Equilíbrio de Preços, foi possível evidenciar-se que, quanto maior o nível de aversão ao risco do produtor, menor é o valor do derivativo. Por fim, ao se analisar a efetividade através dos métodos de *Value at risk*, *Certainty equivalent revenues* e o *Mean root square loss*, todos os testes mostraram a efetividade de proteção nos contratos de derivativos climáticos nas culturas de soja, milho e café, em todas as cidades e regiões estudadas.

Palavras-chave: Derivativo climático; Gerenciamento de riscos; agronegócio; séries temporais; *hedge*.

ABSTRACT

Oliveira, D. E. (2023). *Pricing and hedge effectiveness in weather derivatives to manage risks in Brazilian agribusiness*. Master's Thesis, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

The objective of the present study was to analyze whether weather derivatives can be applied in different Brazilian regions, considering *hedge* effectiveness and demonstrate the most appropriate model for pricing when preparing weather derivative contracts in Brazil. To this end, descriptive research was carried out, with a quantitative approach. The research sample comprised the four largest coffee, corn and soy producing cities in Brazil, between the period 2000 and 2021. Regression and the ARIMA model were used to estimate production in the years 2022 and 2023 and in the estimation, all cities and cultures were significant at 95%. As for temperature data, accommodation reduced the temperature variance, resulting in a more homogeneous distribution. The Durbin Watson test demonstrated the absence of autocorrelation. After estimating the production, the pricing of the weather derivative was carried out, first the pricing was carried out using the Monte Carlo simulation, when carrying out the pricing using the method, it was possible to notice that for all the cities analyzed, relevant values were obtained only for the *Call* (purchase) based on Cooling Degree Days (CDD). The second method used for pricing was *Burn Analysis*, the results show an average *Call* value for all seasons and crops. However, in the city of Brejetuba in the state of Espírito Santo, it was possible to notice a *Call* price (10.83) for the CDD that was higher than the others. This means that the producer has a greater need for cooling grades in coffee production. Regarding pricing based on Price Equilibrium, it was possible to demonstrate that the higher the producer's level of risk aversion, the lower the value of the derivative. Finally, when analyzing the effectiveness through the Value at risk, Certainty equivalent revenues and Mean root square loss methods, all tests showed the effectiveness of protection in weather derivative contracts in soybean, corn and coffee crops in all cities and regions studied.

Keywords: Weather derivative; Risk management; agribusiness; time series; *hedge*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série histórica da temperatura diária em Vitória da Conquista-BA	511
Figura 2 - Série histórica da temperatura diária em Caldas-MG	522
Figura 3 - Série histórica da temperatura diária em Afonso Cláudio-ES.....	52
Figura 4 - Série histórica da temperatura diária em Patrocínio-MG	533
Figura 5 - Série histórica da temperatura diária em Mal. Cândido Rondon-PR	533
Figura 6 - Série histórica da temperatura diária em Maracaju-MS.....	544
Figura 7 - Série histórica da temperatura diária em Rio Verde-GO	544
Figura 8 - Série histórica da temperatura diária em Sorriso-MT	555
Figura 9 - Série histórica da temperatura diária em Tupanciretã-RS	555
Figura 10 - Série histórica da produção de café em Barra do Choça-BA	566
Figura 11 - Série histórica da produção de café em Brejetuba-ES	577
Figura 12 - Série histórica da produção de café em Divinolândia-SP	577
Figura 13 - Série histórica da produção de café em Patrocínio-MG	588
Figura 14 - Série histórica da produção de milho em Maracaju-MS	588
Figura 15 - Série histórica da produção de milho em Rio Verde-GO.....	59
Figura 16 - Série histórica da produção de milho em Toledo-PR.....	59
Figura 17 - Série histórica da produção de milho em Lucas do Rio Verde-MT	60
Figura 18 - Série histórica da produção de soja em Cascavel-PR.....	60
Figura 19 - Série histórica da produção de soja em Rio Verde-GO	611
Figura 20 - Série histórica da produção de soja em Sorriso-MT	611
Figura 21 - Série histórica da produção de soja em Tupanciretã-RS	622

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos anteriores.....	34
Tabela 2 - Produção estimada para as culturas de soja, milho e café no Brasil	377
Tabela 3 - Variáveis coletas das bases meteorológicas do INMET	388
Tabela 4 - Cidade amostra x Estação meteorológica e distância entre as cidades	39
Tabela 5 - Descrição das etapas de execução	40
Tabela 6 - Temperatura basal das culturas deste estudo	444
Tabela 7 - Estatísticas descritivas das temperaturas médias da cultura do café	50
Tabela 8 - Estatísticas descritivas das temperaturas médias da cultura do milho	500
Tabela 9 - Estatísticas descritivas das temperaturas médias da cultura da soja	500
Tabela 10 - Estimativa de produção e renda do produtor no cultivo de café	622
Tabela 11 - Estimativa de produção e renda do produtor no cultivo de milho	633
Tabela 12 - Estimativa de produção e renda do produtor no cultivo de soja	644
Tabela 13 - Precificação do derivativo climático – simulação de Monte Carlo	655
Tabela 14 - Precificação do derivativo climático – <i>Burn Analysis</i>	666
Tabela 15 - Precificação do derivativo climático – Equilíbrio de preços	677
Tabela 16 - Efetividade do derivativo climático – Mean root square loss-MRSL	677
Tabela 17 - Efetividade do derivativo climático – Value at risk-VaR	68
Tabela 18 - Efetividade do derivativo climático – CERs	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B3 - Brasil, Bolsa e Balcão

CAT- *Cumulative Amount of Temperature*

CDD - *Cooling Degree Days*

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

CERs - *Certainty-equivalente Revenues*

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

HDD - *Heating Degree Days*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MGB - Movimento Geométrico Browniano

MRSL - *Mean root square loss*

VaR - *Value at Risk*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Problema de pesquisa	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 Justificativa e contribuições	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Clima e agricultura	18
2.2 Gerenciamento de risco no agronegócio	20
2.3 Precificação de contratos de derivativos climáticos	25
2.4 Efetividade de <i>hedge</i> nos contratos de derivativos climáticos	30
3 METODOLOGIA	36
3.1 Classificação da pesquisa	36
3.2 Amostra e dados	36
3.3 Descrição das etapas	38
3.4 Estimação do nível de produção da soja, milho e café	40
3.5 Modelo de simulação dos dados de temperatura	41
3.6 Índice climático no agronegócio brasileiro	43
3.7 Precificação do derivativo climático	44
3.8 Efetividade do uso de derivativos climáticos	46
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	49
4.1 Estatísticas descritivas	49
4.2 Estimação da produção	56
4.3 Precificação do derivativo climático	65
4.4 Análise de efetividade de <i>hedge</i>	67
4.5 Hipóteses	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O Brasil é internacionalmente conhecido por sua grande capacidade de produção no setor agropecuário. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em nota divulgada em fevereiro de 2023, a balança comercial do agronegócio iniciou o ano com *superavit* de US\$ 8,69 bilhões. Esse valor foi muito acima do *superavit* de US\$ 2,61 bilhões da balança comercial total (Kreter *et al.*, 2023). Esse novo recorde se deve ao aumento de 16,4%, comparado a janeiro de 2022.

Além disso, o Brasil é o terceiro maior exportador mundial de milho, atrás somente dos Estados Unidos e da Argentina e, no que tange à cultura de café, a safra brasileira teve recorde em 2022, segundo o *boletim de acompanhamento da safra brasileira*, da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2023). Outro ponto é que o Brasil é o maior produtor e exportador de soja no mundo, ocupando 50% do comércio mundial (Embrapa, 2021). Entretanto, na direção oposta ao crescimento, o setor agropecuário é constantemente ameaçado por inúmeras intempéries, como pragas, problemas genéticos, enfraquecimento do solo, risco de demanda e dependendo do mercado, até risco ambiental. Tais fatos ilustram a existência de dificuldades no setor que devem ser estudados, para que o produtor rural tenha acesso a instrumentos que forneçam a mitigação desses riscos que assolam o setor agropecuário.

Para a mitigação de riscos, uma das alternativas existentes é o seguro agrícola, criado para tentar minimizar os impactos econômicos gerados pelas perdas das atividades do setor, propiciando a gestão de riscos *antes da porteira*, ou seja, todas as atividades antes da produção. Ademais, outros riscos se devem ao fato de que a economia brasileira passa por taxas de juros balizadoras em financiamentos de curto e longo prazo e câmbio volátil, o que interfere nas atividades de exportação e importação, na oferta e na demanda dos mercados interno e externo das *commodities*, dentre outros fatores que refletem as preocupações do empresário na tomada de decisões sobre a concepção do plantio (Miceli, 2017).

Nesses casos, o risco de preço pode ser gerenciado pelos instrumentos derivativos, cuja função econômica é promover a fixação do preço da mercadoria contra a volatilidade dos preços (Hull, 2021). Sendo assim, os derivativos são instrumentos financeiros negociáveis, cujo valor deriva do preço de mercado à vista, de um ativo que lhes serve de parâmetro, denominado ativo-objeto (Assaf Neto & Lima, 2014). Isso demonstra que essa categoria de derivativos não deve ser a forma mais eficaz de gerenciar risco na agricultura, visto que se trata de um setor no qual os riscos são inúmeros como, por exemplo, a constante mudança climática, derivada do aquecimento global.

Outro exemplo é o evento de severa seca que pode prejudicar a segunda safra de milho, a qual ocorre geralmente entre os meses de janeiro a abril na região centro-sul do país. Em um estudo realizado por Ray *et al.* (2019), utilizou-se da regressão linear para se verificar a relação entre o clima e os dados de colheita. O objetivo era avaliar o impacto potencial da variação climática observada nas 10 principais culturas globais — entre elas, a soja e o milho. O trabalho observou uma variação negativa na Europa, na África e na Austrália, sugerindo que as mudanças climáticas já afetaram a produção global de alimentos.

Devido a essa influência que o clima exerce sobre as produções agrícolas globais, uma das formas de se gerenciar o risco proveniente do clima adverso são os derivativos climáticos. Segundo Richards, Manfredo & Sanders (2004), os derivativos climáticos, comparados aos seguros agrícolas, possuem muitos benefícios ao produtor, visto que o seguro agrícola, em geral, destina-se a cobrir os danos causados por eventos infrequentes e de alta perda. Por outro lado, os derivativos climáticos prometem pagamento ao titular com base na diferença entre um índice meteorológico e um valor previamente precificado e acordado entre as partes, oferecendo uma cobertura chamada de *hedge* para os produtores.

Nesse contexto, a fim de se verificar a efetividade de *hedge* dos derivativos climáticos, Raucci, Capitani & Silveira (2019) projetaram um contrato de derivativo climático e avaliaram a efetividade do *hedge* no mercado brasileiro de soja, sugerindo o uso de opções de venda europeia com dois tipos diferentes de índices de precipitação subjacentes, diária e anual, para seis áreas localizadas no sul do Brasil. Os resultados mostraram que a adoção dos derivativos climáticos reduziu a volatilidade da renda dos produtores em cerca de 30% entre 1992 e 2016, mantendo-se a receita média bruta.

Vedenov & Barnett (2004) focaram as análises em praças produtoras de milho, algodão e soja dos EUA. Admitindo como premissa os contratos de produtores que hipoteticamente não usaram nenhuma forma alternativa de redução de risco, os autores mensuraram a exposição dos produtores ao risco do uso dos contratos por três métricas – *Mean root square loss* (MRSL), *value at risk* (VaR) e equivalente de certeza da receita (CERs) –, usando séries de dados de produtividade e preços de 1972 a 2001. Em geral, não identificaram diferenças significativas na mensuração do risco pelos métodos calculados. No entanto, o estudo apontou que a efetividade dos derivativos climáticos varia significativamente, conforme a região produtora e a cultura analisada, podendo, inclusive, influenciar o risco aumentar, dependendo da combinação entre cultura e região analisada.

Outros estudos investigaram o uso de derivativos climáticos na agricultura (Tyagi & Shastri, 2016; Vedenov & Barnet, 2014; Ivanovic, Paji & Markovic, 2014), conforme tabela 01

na seção 2.4 deste estudo. No entanto, no Brasil, a pesquisa envolvendo essa categoria de derivativo ainda caminha em passos lentos, mesmo que a atividade agrícola, no país, tenha desempenhado um papel importante na oferta mundial de *commodities* (Pereira Júnior & Malaquias, 2020).

1.2 Problema de pesquisa

Uma das dificuldades encontradas na literatura referente à aplicabilidade dos derivativos climáticos no Brasil está na precificação do contrato. Com isso, Lemos (2014) implementou uma metodologia de precificação desses contratos utilizando a variável de temperatura média diária no Brasil. Os principais desafios encontrados pelo autor nessa abordagem foram as falhas nas séries temporais. Além disso, a precificação dos contratos foi feita pelos métodos de *Burning cost*, Modelagem do Índice e Modelagem da temperatura média diária.

Alves Neto (2021) em seu estudo, utilizou métodos de precificação de derivativos climáticos e métricas de efetividade para discursar sobre a aplicabilidade na implementação do uso desse derivativo para o cultivo da soja no estado do Mato Grosso. Apesar de o estudo demonstrar aplicabilidade no estado do Mato Grosso, faz-se necessário analisar e compreender a efetividade dos derivativos climáticos em diferentes regiões brasileiras, baseados não apenas na soja, mas nas principais culturas produzidas no Brasil.

Diante disso, o presente estudo pretende responder ao seguinte problema de pesquisa:

Qual a efetividade do *hedge* em derivativos climáticos nas culturas de soja, milho e café em diversas regiões do Brasil?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Diante disso, o objetivo deste estudo é avaliar a efetividade do uso de derivativos climáticos como estratégia de *hedge* nas culturas de soja, milho e café em diferentes regiões do Brasil, fornecendo *insights* sobre a viabilidade e a aplicabilidade desses instrumentos financeiros para a gestão de riscos no agronegócio brasileiro.

1.3.2 Objetivos específicos

Quanto aos objetivos específicos, este estudo propõe:

- a) avaliar a efetividade dos derivativos climáticos como estratégia de *hedge* nas culturas de soja, milho e café em diversas regiões do Brasil;
- b) identificar os desafios e oportunidades na implementação de derivativos climáticos no Brasil, com base na análise dos dados das estações meteorológicas disponíveis;
- c) comparar e selecionar modelos de precificação eficazes para a elaboração de contratos de derivativos climáticos; e
- d) fornecer análises críticas dos modelos de precificação utilizados, com o objetivo de oferecer recomendações para apoiar a implantação bem-sucedida de derivativos climáticos no mercado de capitais brasileiro.

1.4 Justificativa e contribuições

A pesquisa científica apresenta-se como um dos mecanismos que possibilita a explicação da realidade. Tendo em vista que, no âmbito mundial, já existem negociações de derivativos climáticos e que o Brasil está desenvolvendo o mercado de capitais, este estudo pode contribuir, explicando a realidade mundial e aproximando o mercado nacional da possibilidade de se utilizar um modelo mais avançado no gerenciamento de risco no gerenciar setor que mais contribui para a exportação no país.

Conforme pesquisa exploratória, revisando a bibliografia sobre o tema, Pereira Júnior e Malaquias (2020) identificaram que o mercado de derivativos climáticos ainda é incipiente no cenário internacional, e, no Brasil, os produtores que não estão no mercado de capitais mundial, não têm a possibilidade de contratação de derivativos climáticos para cidades brasileiras. Além disso, no Brasil, estudos sobre o tema ainda estão em fase seminal, com poucas pesquisas, visto que no mercado financeiro brasileiro ainda não existe a oferta de derivativos climáticos, surgindo, assim, uma oportunidade para estudo que poderá contribuir para a sua implantação.

Apesar de os estudos (Alves Neto, 2021 & Raucci *et al.*, 2019) explorarem o tema, ainda não há consenso sobre o melhor método para se precificar o contrato de derivativo climático. Nessa mesma lacuna, também não há estudos que analisem a efetividade de *hedge* em outras culturas diferentes da soja e em diferentes regiões do Brasil. Por isso, ao se precificar e estudar a aplicabilidade para as culturas de soja, milho e café em diferentes regiões brasileiras, este estudo pretende obter abrangência nacional e fornecer maior representatividade das parcelas das *commodities* mais negociadas no mercado brasileiro.

Ademais, em abril de 2021 a Brasil, Bolsa, Balcão (B3) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) firmaram protocolo de intenções, sendo que o intuito inicial do acordo prevê acesso amplo às informações do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (B3, 2021).

Esse acordo indica que, nos próximos anos, os contratos de derivativos climáticos poderão ser negociados no Brasil, visto que o acesso ao banco de dados meteorológicos é uma peça fundamental para a precificação dessa categoria de derivativo. Além disso, sabendo dos benefícios de se utilizar o derivativo como ferramenta na gestão de riscos em âmbito mundial, e tendo em vista que o agronegócio representa 23% do PIB nacional, segundo o CEPEA (2022), este estudo pretende fornecer base conceitual para futura aplicação no mercado de capitais brasileiro, beneficiando inúmeros produtores, ao possibilitar o gerenciamento de riscos relacionados a intempéries climáticas.

Quanto às contribuições práticas, este estudo pretende servir de apoio para a precificação e análise da efetividade de *hedge* dos contratos de derivativos climáticos no agronegócio brasileiro. Além disso, para a comunidade acadêmica, por se tratar de um estudo que aborda um tema que caminha em passos lentos no Brasil, os resultados podem contribuir de maneira substancial para a evolução da gestão de riscos no setor e propiciar base para novas pesquisas e discussões entre os pesquisadores diversos, além de contribuir para a evolução do mercado de capitais brasileiro, trazendo benefícios e possibilitando um melhor gerenciamento e diminuição dos riscos aos produtores rurais do Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O clima tem um efeito significativo em diferentes atividades econômicas e, pode-se dizer, que representa uma das fontes de risco mais incontroláveis, segundo Tesfahun *et al.* (2019). No que diz respeito à produção agrícola, o clima contribui ativamente para o bom andamento das safras e da produção de alimentos e, com isso, se torna fundamental no processo de organização do espaço agrário em sua totalidade. Sob uma perspectiva semelhante, Ribeiro (1993) menciona que o clima é condicionante do processo produtivo, de modo que as culturas devem ser adaptadas ao modelo de oferta climática, que varia no tempo e no espaço. Sendo assim, existem zonas climáticas mais favoráveis para o plantio de determinadas culturas e zonas que podem até limitar o desenvolvimento de outras.

Nesse contexto, a soja é uma das oleaginosas cultivadas mais importantes, iniciando por sua grande demanda por exportação, presente na demanda mundial de óleos vegetais, na capacidade de ofertar proteínas e na produção de biodiesel (Motta *et al.*, 2008). Em âmbito

mundial, o Brasil é o maior produtor e exportador de soja no mundo, ocupando 50% do comércio mundial (Embrapa, 2021), tornando a produção dessa cultura um objeto de estudo de grande utilidade. Desse modo, condições ambientais desfavoráveis à planta durante a fase de desenvolvimento da semente podem impedir que ela atinja um nível de vigor tão elevado quanto deveria em condições favoráveis (Popinigis, 1985).

Pensando nisso, os derivativos climáticos são uma ferramenta importante de gestão de riscos para reduzir perdas financeiras causadas por flutuações inesperadas nas condições meteorológicas (Alves Neto, 2021). Contudo, apesar de os derivativos climáticos serem projetados para proteger as empresas de eventos climáticos não catastróficos, o ativo do derivativo é uma variável climática e, por não possuir valor específico, é necessária a utilização de modelos para a precificação.

Portanto, esta seção tem por objetivo trazer aspectos, definições e estudos relevantes que relacionem a importância do agronegócio na economia nacional, bem como a influência do clima na produção nacional. A fim de auxiliar na compreensão dos objetivos propostos neste estudo, serão apresentados conceitos que ajudarão a construir o propósito do uso de derivativos climáticos para gerenciamento de risco, bem como os modelos a serem utilizados para demonstrar a precificação do contrato de derivativo climático e analisar a efetividade de *hedge* promovida por eles.

2.1 Clima e agricultura

Conforme os dados revelados no Sexto Relatório de Análise (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021a, 2022)-*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), o nosso planeta está experimentando um processo de aquecimento que ocorre a uma taxa mais acelerada do que as estimativas anteriormente consideradas. Esse fenômeno representa uma iminente trajetória climática caracterizada por riscos sistêmicos. O aumento da temperatura média global tem desencadeado uma série de impactos, tais como o aumento das temperaturas diárias, ocorrência mais frequente de inundações, secas e outros eventos climáticos extremos.

A comunidade científica tem enfatizado, de maneira contundente, a necessidade urgente de adotar medidas eficazes para conter o avanço do aquecimento global. Infelizmente, temos observado um descompasso alarmante entre essa conscientização e a implementação de ações práticas direcionadas a essa finalidade. Esse descompasso tem, lamentavelmente, contribuído para o agravamento dos distúrbios climáticos sistêmicos (Al-Ghussain, 2019).

Com as mudanças climáticas já em andamento, tornam-se inevitáveis e prementes os desafios relacionados à adaptação e à mitigação, especialmente nos sistemas que dependem intensivamente de recursos naturais e combustíveis fósseis, como o atual modelo de desenvolvimento agropecuário.

Vale ressaltar que a percepção da mudança climática pode variar significativamente entre diferentes atores e, mesmo quando compreendida, as respostas, muitas vezes, como evidenciado no caso dos agricultores, são influenciadas por suas crenças e valores preexistentes (Roncoli, 2006), contribuindo para se explicar por que a conscientização sobre essas mudanças é relativamente menor entre grupos de agricultores em estágios tecnologicamente mais avançados de produção em países desenvolvidos, a exemplo do que ocorre na Austrália e na região oeste dos Estados Unidos (Roncoli, 2006).

Ao negligenciarem as causas antropogênicas do aquecimento global, muitos agricultores tendem a subestimar as necessidades de adaptação e mitigação, pois acreditam que as incertezas climáticas futuras podem ser adequadamente enfrentadas por meio da aplicação de tecnologias como solução para o problema (Arbuckle, Morton & Hobbs, 2015). De acordo com esses autores, ao se analisar o setor agropecuário no estado de Mato Grosso, a fé nos avanços tecnológicos alimenta o ceticismo de uma parte dos agricultores, que enxergam os benefícios decorrentes das mudanças associadas às variações climáticas já observadas na região.

No período de 1962 a 1988, o pesquisador Thompson empreendeu uma investigação acerca da relação entre clima, tecnologia e rendimentos de milho e soja. Desde então, muitos modelos de regressão múltipla foram desenvolvidos com base em seus estudos. O modelo de colheita/clima de Thompson foi empregado para avaliar o impacto das mudanças climáticas e da variabilidade climática nas produtividades de milho e soja, desde 1930, em cinco estados do Cinturão do Milho dos Estados Unidos, nomeadamente, Illinois, Indiana, Iowa, Missouri e Ohio. O modelo de Thompson, desenvolvido em 1986 e 1988, consiste em uma equação quadrática simples que visa estimar os efeitos dos desvios do clima em relação ao padrão normal na produtividade do milho:

$$Y^L = a^L + \sum_{i=1}^6 b_i^L X_i^L + \sum_{i=1}^6 c_i^L (X_i^L)^2 + \sum_{j=1}^3 d_j^L t_j + \varepsilon^L \quad (1)$$

em que Y^L é o rendimento de milho para o local L (Illinois, Indiana, Iowa, Missouri e Ohio), X_1^L é o desvio da precipitação média da pré-colheita (setembro a junho), X_2^L é o desvio da

temperatura média de junho, X_3^L é o desvio de precipitação média de julho, X_4^L é o desvio da temperatura média de julho, X_5^L é o desvio da precipitação média de agosto, X_6^L é o desvio da temperatura média de agosto, t_1 é a primeira tendência temporal (1930-1959), t_2 é a segunda tendência temporal (1960-1972), e t_3 é a terceira tendência temporal (1973-1983).

Inicialmente, o autor identificou que todos os seis coeficientes associados às variáveis meteorológicas quadráticas apresentaram estimativas negativas, sugerindo que condições climáticas extremas, independentemente da direção, tendem a diminuir o rendimento das culturas. Além disso, o autor observou que os maiores rendimentos de milho estavam correlacionados com as seguintes condições climáticas: precipitação dentro da média pré-colheita, temperaturas normais em junho, temperaturas abaixo do normal em julho e agosto, e precipitação acima da média em julho e agosto.

Em um estudo posterior, conduzido por Turvey (2001) para avaliar os efeitos climáticos sobre o rendimento das culturas, foram destacadas duas principais divergências em relação ao modelo de Thompson. Primeiramente, Turvey utilizou unidades de precipitação acumulada e calor acumulado a partir de 1º de junho a 31 de agosto como variáveis independentes na função de produção do tipo *Cobb-Douglas*, em contrapartida ao uso de precipitação mensal e temperatura na equação quadrática de Thompson. Em segundo lugar, os rendimentos das culturas foram ajustados através de uma equação de tendência linear.

Dentro desse contexto, Turvey estimou os efeitos climáticos em três tipos de culturas: milho, soja e feno, com base em dados coletados no condado de Oxford, Ontário, durante o período de 1935 a 1996. O coeficiente de determinação (R^2) para todas as três culturas foi aproximadamente 0,30. Turvey observou que, tanto os coeficientes de precipitação quanto de calor para o milho e a soja, eram positivos, sendo que apenas o coeficiente de calor se mostrou estatisticamente significativo. Em relação ao feno, ele identificou uma relação positiva e significativa com a precipitação, enquanto o coeficiente de calor foi negativo e não significativo.

2.2 Gerenciamento de risco no agronegócio

O gerenciamento de riscos desempenha um papel crucial na mitigação das diversas incertezas que afetam o setor agropecuário, abrangendo fatores como oferta e demanda, câmbio, taxas de juros e, notavelmente, os efeitos das variações climáticas. Nesse contexto, a ampliação do mercado de derivativos possibilita, avanços e aprimoramentos nas estratégias de redução desses riscos, incluindo a substituição do seguro agrícola convencional por contratos de derivativos climáticos. Com os riscos inerentes à atividade agropecuária, o preço de venda no

momento da comercialização muitas vezes escapa ao controle do produtor, gerando incertezas tanto para ele quanto para os financiadores da operação (Schouchana, Sheng & Decotelli, 2013).

Nesse sentido, Gonçalves e Souza (2009) conduziram uma investigação sobre os mecanismos viáveis de proteção de preços agropecuários por meio do mercado, com o objetivo de viabilizar a execução de políticas públicas na safra 2008-2009. Os autores buscaram desenvolver instrumentos de gerenciamento de risco para tornar a agropecuária uma atividade mais estável e lucrativa, permitindo decisões de investimento em inovação. Essa iniciativa consiste em transferir para o mercado a responsabilidade pela gestão dos riscos associados às flutuações de preços das *commodities*.

O risco, de acordo com a definição de Nelson (1961), refere-se à impossibilidade de um agente econômico prever o valor ou a magnitude de uma variável relevante em um momento futuro. Portanto, o risco é a potencial ocorrência de perdas devido a impactos negativos ou a eventos imprevisíveis que podem afetar o desenvolvimento e, conseqüentemente, a geração de receitas. Conforme destacado por Ozaki (2012), os principais riscos no agronegócio incluem os riscos de produção, que podem ser mitigados por meio de medidas como zoneamento agrícola, seguro agrícola e adoção de tecnologia; riscos de preço, que podem ser gerenciados por meio de contratos futuros, a termo e opções; riscos de crédito, que podem ser mitigados por meio de práticas como avaliação de crédito, fornecimento de garantias, seguros, emissão de novos títulos e certificação de crédito positiva; e riscos contratuais, que podem ser gerenciados por meio de cláusulas de arbitragem.

O seguro agrícola tem a função de indenizar o produtor, sempre que a produção estiver em um patamar abaixo da produtividade segurada. O mecanismo de compensação I para cada propriedade rural i pode ser expressa da seguinte forma:

$$I_i = \max \left\{ \left[\frac{y_i^c - y_i}{y_i^c} \right], 0 \right\}, \quad (2)$$

Em que:

y_i^c é o nível de produtividade garantida da i -ésima produtividade rural; e

y_i é a produtividade observada da i -ésima propriedade rural.

Sob a perspectiva das seguradoras, o seguro agrícola envolve a consideração do risco de eventos catastróficos. Esse tipo de risco é caracterizado por fenômenos adversos que afetam uma grande quantidade de segurados ao mesmo tempo (Ozaki, 2006). Em busca de atenuar os riscos inerentes ao setor agropecuário, Crane *et al.* (2013) conduziram um estudo abrangendo o gerenciamento de riscos nesse contexto. Os autores identificaram cinco fontes principais de risco:

- **Risco da Produção:** envolve a probabilidade de redução nos rendimentos da produção e é influenciado por diversas variáveis, incluindo condições climáticas adversas, infestações de pragas, doenças, tecnologia utilizada, genética das culturas e qualidade dos insumos.
- **Risco de Mercado:** afeta os resultados financeiros e pode se manifestar por meio da volatilidade dos preços de venda dos produtos agrícolas e dos custos dos insumos, bem como pela acessibilidade aos mercados.
- **Risco Financeiro:** compreende ameaças à saúde financeira e possui quatro componentes fundamentais: custo e disponibilidade de capital; capacidade de cumprir as obrigações de fluxo de caixa em tempo hábil; capacidade de manter e expandir o patrimônio; e capacidade de absorver choques financeiros de curto prazo.
- **Risco Legal:** envolve implicações legais e é associado a questões, como arranjos contratuais, estrutura jurídica das empresas, conformidade com leis e regulamentos, responsabilidade legal por delitos e políticas públicas e atitudes governamentais.
- **Risco na Gestão de Pessoas:** nesse caso, as pessoas podem ser tanto fontes de risco quanto parte integrante das estratégias de mitigação de riscos. O gerenciamento de riscos relacionados à gestão de pessoas aborda questões de segurança, satisfação e produtividade dos colaboradores, englobando aspectos, como saúde e bem-estar dos funcionários, relações familiares e comerciais, administração de recursos humanos e planejamento de transição.

Considerando essas diversas fontes de risco, é fundamental para o setor agropecuário adotar estratégias de gerenciamento de riscos abrangentes e eficazes, que podem incluir o uso de seguros agrícolas, contratos de derivativos, práticas agronômicas avançadas, e a diversificação de culturas, entre outras medidas. O gerenciamento adequado desses riscos é essencial para promover a estabilidade e a rentabilidade nas atividades agropecuárias.

Na agricultura brasileira, análises da Embrapa evidenciam perda anual próxima de R\$ 11 bilhões (1% do PIB agrícola), devida a eventos extremos. E a tendência é de aumento, em função do baixo nível de mitigação das emissões de carbono em nível global. Segundo o Inmet — Instituto Nacional de Meteorologia, no Brasil, os danos causados pelo clima à economia foram de R\$ 168,2 bilhões, entre 2010 e 2019. Cerca de 46 milhões de pessoas foram afetadas por chuvas intensas e alagamentos, com perdas de R\$ 30,7 bilhões. E as secas causaram impacto ainda maior: 212 milhões de habitantes e estrago econômico de R\$ 132,7 bilhões.

Dessa forma, quando se trata de variações climáticas que impactam de maneira negativa no crescimento e produção das culturas, pode-se considerar os derivativos climáticos. Diferente dos seguros, o derivativo climático não exerce apenas a função de *hedge* (proteção) em face de riscos meteorológicos, mas também proporcionam um instrumento de investimento que os agentes econômicos podem contratar para diversificação de suas carteiras (Sun e Kooten, 2015).

Recorrendo à história, a primeira transação no mercado de derivativos climáticos ocorreu em 1997, entre as empresas Aquilla Energy e ConEdison Company. O objetivo principal da transação era fazer com que a Aquilla Energy vendesse energia elétrica com desconto para a ConEdison Company, caso as temperaturas de agosto de 1996 fossem mais baixas que as esperadas (Weagley, 2014). Portanto, o ativo acordado proporcionou um meio de mitigar o risco de variabilidade no preço da energia elétrica, decorrente de mudanças em seus níveis de consumo (Labuszewski *et al.*, 2010). Desde a primeira transação, muitos trabalhos foram feitos, contribuindo com métricas distintas e modelos para análise da precificação de contratos climáticos, bem como na concepção do desenho desses contratos (Sun & Van Kooten, 2015), (Yua, Göncü & Ökten, 2015), (Hess, 2016, 2018), (Kermiche & Vuillermet, 2016) e (Türkvatan Hayfavi & Omay, 2020).

Sendo assim, um contrato de derivativo climático é um contrato utilizado para mitigar riscos relacionados a variações climáticas e estes contratos possuem características semelhantes às dos seguros agrícolas, sendo uma forma de proteção atuarial para a produção, o patrimônio e até mesmo a vida do produtor rural. Alguns autores como Morduch (2001), Turvey (2001), Botos e Ciumas (2012) e Purnanandam e Weagley (2016) apontam que o uso de derivativos climáticos, ou seguros rurais atrelados a variáveis climáticas, reduz sensivelmente os problemas de contratos baseados em indicadores de produtividade. Devido a fortes variações climáticas no final dos anos 90, surgiu a necessidade de se criar um instrumento que fosse capaz de minimizar os riscos provenientes dessas flutuações meteorológicas.

A distinção fundamental entre derivativos climáticos e contratos de seguro reside no aspecto burocrático que envolve o produtor para receber indenização. Em contratos de seguro tradicionais, o produtor precisa comprovar que sofreu uma perda financeira devido às condições climáticas para ser elegível para indenização. Por outro lado, os derivativos climáticos se baseiam unicamente no resultado real do clima, independentemente de como o produtor foi afetado. Além disso, qualquer investidor, inclusive aqueles que especulam no mercado, pode adquirir contratos de derivativos climáticos (Alaton, Djehiche & Stillberger, 2002).

Além disso, no agronegócio, a taxa de sucesso no desenvolvimento de uma cultura está diretamente ligada à temperatura da região em que a plantação está localizada. De acordo com

Pereira, Angelocci & Sentelhas (2002), cada cultura possui uma temperatura base, abaixo da qual a planta não se desenvolve. Cada grau de temperatura acima da temperatura base é contado como um grau-dia (GD). Para que a cultura atinja uma de suas fases fenológicas ou amadureça completamente, é necessário acumular uma constante térmica (CT), que é o total de GD acumulados ao longo desse período.

Nesse contexto, o produtor pode estabelecer um contrato de derivativo climático cujo resultado financeiro esteja inversamente relacionado às suas expectativas de produção em relação à cultura. Em outras palavras, se a quantidade de graus-dia acumulados durante o período apropriado não for atingida, o produtor receberá o retorno financeiro conforme o acordo estabelecido (Lemos, 2014). Baseando-se nesse conceito, Seth, Ansari & Datta (2009) buscaram entender os determinantes do uso de derivativos climáticos por agricultores de pequeno porte na Índia. Por meio de questionários e modelos *Probit* e *Logit*, procuraram identificar as variáveis mais relevantes na tomada de decisão. Os resultados revelaram que a probabilidade de uso de derivativos climáticos aumenta com a redução do valor do prêmio, com o aumento do nível de educação do produtor e com um maior conhecimento sobre diferentes produtos de seguro rural.

De acordo com o estudo conduzido por Khan, Rennie & Charlebois (2013), que se assemelha ao trabalho realizado por Seth *et al.* (2009), a gestão de riscos relacionados ao clima entre os produtores de grãos na província canadense de Saskatchewan revelou um baixo uso de derivativos climáticos, com menos de 10% dos produtores fazendo uso desse instrumento. O estudo apontou que a principal razão para essa baixa utilização de derivativos climáticos foi a falta de conhecimento sobre esses instrumentos, uma vez que 59% dos produtores que não usavam seguros baseados em índices climáticos desconheciam essa modalidade contratual.

Esses resultados corroboram a revisão realizada por Raucci *et al.* (2020), que também destacou a dificuldade dos produtores em compreender o funcionamento dos contratos de derivativos climáticos, o que leva à baixa demanda por esses instrumentos de mitigação de riscos. Essa falta de compreensão e conhecimento sobre como os derivativos climáticos operam pode ser um obstáculo significativo para a adoção mais ampla dessas ferramentas no setor agrícola.

Portanto, a conscientização e a educação dos produtores sobre os benefícios e o funcionamento dos derivativos climáticos podem desempenhar um papel importante no aumento da sua utilização e na melhoria da gestão de riscos no agronegócio. A disseminação de informações e a promoção de programas de capacitação podem ajudar os agricultores a tomar

decisões mais informadas em relação a esses instrumentos e, assim, melhorar sua resiliência diante dos riscos climáticos.

2.3 Precificação de contratos de derivativos climáticos

Para que um contrato de derivativo climático cumpra efetivamente seu papel na gestão de riscos, vários fatores precisam ser cuidadosamente considerados. Isso inclui o adequado delineamento dos índices climáticos que serão usados e a construção de um modelo de precificação que seja claro e compatível com a natureza complexa das variações climáticas (Jewson & Brix, 2005).

De acordo com Richards *et al.* (2004), os modelos de precificação de contratos climáticos que não incorporam a preferência do consumidor em sua estrutura não são capazes de precificar o risco com precisão. Isso realça a importância de considerar as preferências e necessidades dos envolvidos ao desenvolver modelos de precificação de derivativos climáticos.

Um exemplo clássico de modelo de precificação em finanças é o modelo Black-Scholes, que foi originalmente desenvolvido para precificar opções de ações. Esse modelo é baseado em uma carteira sem risco composta por uma posição na opção e uma posição na ação subjacente, mantida por um curto período. A equação de precificação de Black-Scholes pode ser derivada resolvendo sua equação diferencial ou usando uma abordagem de avaliação neutra ao risco. Essa abordagem pressupõe que o preço da ação subjacente segue um processo de difusão log-normal e que o retorno da ação segue uma distribuição log-normal. Uma característica notável da fórmula Black-Scholes é que ela não depende das preferências do investidor ou do conhecimento do retorno esperado do ativo subjacente.

No contexto dos derivativos climáticos, a construção de modelos de precificação eficazes é crucial para determinar os preços justos desses contratos, tornando-os atraentes para produtores, investidores e outras partes interessadas. Esses modelos devem levar em consideração as especificidades das variabilidades climáticas e as preferências dos participantes do mercado, garantindo uma gestão eficaz de riscos no agronegócio.

Os modelos clássicos de precificação, como o modelo Black-Scholes, são a base da teoria financeira e são amplamente aplicados à precificação de opções financeiras, incluindo as opções de ações. No entanto, esses modelos têm limitações quando se trata de ativos subjacentes que exibem padrões sazonais, como *commodities* agrícolas. Isso ocorre porque esses ativos estão sujeitos a flutuações sazonais, devido a ciclos de plantio, colheita, condições climáticas e outros fatores que não podem ser adequadamente capturados por modelos que pressupõem distribuições normais de retornos.

Para abordar as limitações dos modelos clássicos, Merton (1976) e Cox e Ross (1976) introduziram modificações que permitem lidar com retornos de ativos subjacentes que são descontínuos e apresentam saltos. Eles desenvolveram fórmulas mais gerais para a precificação de opções que incluem tanto processos estocásticos contínuos quanto processos de salto. Essas fórmulas levam em consideração a ocorrência de saltos nos preços dos ativos, que podem ocorrer, por exemplo, devido a eventos inesperados que afetam o mercado.

No entanto, essas fórmulas mais gerais têm soluções simples e fechadas apenas em casos específicos, como quando a ação subjacente não paga dividendos ou quando paga um dividendo contínuo proporcional ao preço da ação. Para outras políticas de dividendos, especialmente aquelas mais complexas, pode ser necessário recorrer a métodos numéricos para resolver as equações diferenciais subjacentes. Além disso, se a distribuição do valor terminal do ativo subjacente não seguir uma distribuição conhecida, o cálculo do valor da opção pode exigir integração numérica, uma vez que as integrais envolvidas podem não ter soluções analíticas.

Essas modificações e extensões dos modelos de precificação são importantes para lidar com ativos financeiros e *commodities* cujos preços não se encaixam perfeitamente nos pressupostos dos modelos clássicos, tornando a teoria de precificação mais flexível e aplicável a uma gama mais ampla de ativos e situações.

O método de simulação de Monte Carlo, desenvolvido por Boyle (1977), desempenha um papel crucial na avaliação numérica de opções e é particularmente valioso em cenários nos quais os modelos de precificação clássicos, como o modelo Black-Scholes, não são apropriados. Esse método é altamente flexível e pode ser adaptado para acomodar uma variedade de processos estocásticos que governam os retornos dos ativos subjacentes.

Uma das vantagens distintas da simulação de Monte Carlo é a sua aplicabilidade a situações especiais que envolvem processos de salto, como é frequentemente o caso em derivativos climáticos e outros ativos com características não usuais. Por meio dessa técnica, é possível calcular valores de opções e derivativos climáticos, levando em consideração a complexidade inerente a esses ativos e seus movimentos de preços não convencionais.

Dischel (1998) destacou a inadequação do modelo Black-Scholes na avaliação de derivativos climáticos e argumentou que as simulações estocásticas de Monte Carlo são modelos mais eficazes para esse fim. Uma das razões fundamentais para não aplicar o modelo Black-Scholes a opções meteorológicas é a ausência de um ativo subjacente negociável. No modelo Black-Scholes tradicional, a precificação é baseada em uma carteira sem risco que consiste em posições longas e curtas de opções e ativos subjacentes.

Essa estrutura não pode ser aplicada a derivativos climáticos, uma vez que não há um ativo subjacente diretamente relacionado ao clima. Portanto, a simulação de Monte Carlo se destaca como uma ferramenta valiosa para a avaliação precisa de derivativos climáticos e outros instrumentos financeiros complexos e não convencionais. O autor sugere uma equação que incorpora a reversão à média meteorológica e separa as tendências da volatilidade de curto prazo como:

$$dT = [\alpha\theta(t) + \beta T(t)]dt + \gamma\tau(t)dz_1 + \delta\sigma(t)dz_2, \quad (3)$$

em que T é alguma variável climática (temperatura ou precipitação) que varia ao longo do tempo t , o parâmetro θ é a medida da média histórica dessa variável à medida que ela se move com as estações e é o núcleo gravitacional para o qual a variável simulada reverte na ausência de aleatoriedade. Há a separação da distribuição de T da mudança em T e as designa como τ e σ , respectivamente. Então, são geradas as amostras das duas distribuições separadamente, extraído-se, dos processos de Wiener, dz_1 e dz_2 . Sendo assim, o modelo contribui para a precificação de derivativos climáticos por meio da simulação estocástica de Monte Carlo, considerando processos de reversão à média em variáveis climáticas.

O estudo de Jewson e Brix (2005) destaca a importância de se incluírem certas especificidades em contratos de derivativos climáticos para garantir sua eficácia e precisão. Essas especificidades incluem:

- **Período do contrato em dias:** é essencial definir o período do contrato em dias para se garantir a precisão na medição da variação climática, permitindo-se que as partes contratantes estabeleçam claramente o intervalo de tempo durante o qual a variável climática será monitorada e avaliada.
- **Estação meteorológica:** deve ser especificada a estação meteorológica que será usada para medir a variável climática. A escolha da estação é crítica, pois afeta diretamente a qualidade e a precisão dos dados climáticos coletados. A localização da estação deve ser estrategicamente selecionada para representar adequadamente as condições climáticas da região de interesse.
- **Variável climática:** o contrato deve definir a variável climática que será monitorada e usada como referência para a precificação. Isso pode incluir temperaturas mínimas ou máximas, precipitação, graus-dia acumulados, entre outros, dependendo das necessidades das partes envolvidas.

- **Estrutura de precificação dos prêmios:** a estrutura de precificação do contrato de derivativo climático deve ser claramente delineada. Isso envolve a especificação de como os prêmios serão calculados com base nos dados climáticos observados. Os métodos de precificação devem ser transparentes e acordados entre as partes contratantes.

No que diz respeito à precificação, os autores mencionam que os métodos de precificação atuarial para derivativos climáticos dependem da modelagem estatística de séries temporais históricas de dados meteorológicos estacionários. Isso implica na análise de padrões climáticos passados para estimar a probabilidade de ocorrência de eventos climáticos específicos no futuro. Essa abordagem estatística desempenha um papel fundamental na determinação dos prêmios do contrato e na avaliação dos riscos envolvidos nos derivativos climáticos.

No Brasil, através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), é possível se obterem dados históricos de 602 estações meteorológicas, que contêm medidas de temperatura e pluviosidade por ano, cidade e dados por hora das medições. Segundo Considine (2000), é muito importante ter a análise de graus-dia nesse modelo de precificação. Esse índice de graus-dias originou-se pela indústria de energia e está diretamente relacionado a resfriamento e aquecimento. Sendo assim, criaram-se três índices: graus-dia de resfriamento – *Cooling Degree Days* (CDD); graus-dia de aquecimento – *Heating Degree Days* (HDD) e o Valor de temperatura acumulada – *Cumulative Amount of Temperature* (CAT).

O *Heating Degree Days* (HDD) é utilizado para mensurar a demanda por aquecimento, ou seja, quanto mais frio estiver, maior será a demanda do HDD. Por outro lado, o *Cooling Degree Days* (CDD) é o índice usado no verão para se mensurar a demanda por energia utilizada no resfriamento, em resumo, trata-se de uma medida de quanto mais quente, maior o CDD. O Terceiro índice utilizado na Europa, é o *Cumulative Amount of Temperature* (CAT), sendo criado inicialmente para substituir o Índice CDD em regiões nas quais as temperaturas são mais quentes, sendo que, nessas regiões, não se obtinham valores para o CDD (Considine, 2000).

A abordagem proposta por Schiller, Seidler e Wimmer (2012) para a precificação de derivativos climáticos é baseada em um modelo que utiliza *splines*, que são uma ferramenta importante em estatística e modelagem. Um *spline* é, essencialmente, uma curva flexível usada para conectar pontos de dados pré-determinados de uma forma suave e contínua. Essa técnica é frequentemente empregada para modelar relações entre variáveis quando a suposição de linearidade não é apropriada, ou quando se deseja capturar nuances na relação entre as variáveis.

A principal vantagem do uso de *splines* é a flexibilidade que eles oferecem na modelagem. Em vez de assumir uma relação linear entre as variáveis, os *splines* permitem que os dados “ditem” a forma da curva. Isso é particularmente valioso ao lidar com séries temporais de dados climáticos, uma vez que as relações entre o clima e outros fatores, como preços de derivativos climáticos, podem ser complexas e não lineares.

No contexto da precificação de derivativos climáticos, a abordagem com *splines* proposta por esses autores permite que os efeitos de tendência e sazonalidade nas séries temporais sejam tratados de maneira flexível e adaptável. Isso é crucial para modelar e prever as condições climáticas e, por extensão, os preços dos derivativos climáticos. Os *splines* ajudam a capturar as flutuações e padrões nas séries temporais climáticas de uma forma que pode ser incorporada no processo de precificação, tornando-o mais preciso e eficaz na gestão de riscos relacionados ao clima.

Sendo assim, a pesquisa conduzida por Schiller, Seidler e Wimmer (2012) é de grande importância no contexto da precificação de derivativos climáticos, pois comparou diferentes modelos para prever índices de graus-dia de aquecimento (HDD) e graus-dia de resfriamento (CDD) usando dados históricos de 35 estações climáticas nos EUA. O estudo avaliou o desempenho dos modelos em relação à previsão desses índices climáticos.

Os resultados indicaram que todos os modelos tiveram um desempenho melhor na previsão de índices de HDD do que na previsão de CDD. Isso pode ser atribuído às diferenças nas relações climáticas e nas complexidades associadas a cada tipo de índice. É importante destacar que a previsão de CDD, relacionada ao resfriamento durante o verão, pode ser mais desafiadora devido à variabilidade climática e ao fato de que os modelos baseados em simulação diária subestimaram a variância dos erros.

A pesquisa destaca a complexidade da precificação de derivativos climáticos e a importância de se escolher cuidadosamente o modelo apropriado com base no tipo de contrato e nas variáveis climáticas em questão. Modelos inadequados podem levar a previsões imprecisas e impactar a eficácia da gestão de riscos climáticos.

Para lidar com os desafios da precificação de derivativos climáticos, Caporin e Pres (2006) apresentaram uma abordagem de precificação atuarial que envolve três modelos: *Burning cost*, modelagem de índice e modelagem das temperaturas diárias. O modelo *Burning cost* é baseado na experiência histórica e pode ser ajustado para se tornar um preditor válido. O modelo de índice é construído com base em dados históricos e informações sobre a variável climática de interesse, e a distribuição de probabilidade da variável é ajustada. A partir disso, simulações podem ser realizadas com base na distribuição ajustada.

Essa abordagem combina elementos da experiência histórica com modelagem estatística para melhor prever e precificar derivativos climáticos, oferecendo uma estrutura que pode ser aplicada a uma variedade de situações e contratos climáticos. A abordagem atuarial busca lidar com a complexidade e incerteza associadas à precificação de derivativos climáticos, oferecendo uma ferramenta valiosa para a gestão de riscos relacionados ao clima.

Por outro lado, a modelagem das temperaturas diárias desempenha um papel crucial na avaliação de derivativos climáticos, pois tenta reproduzir o comportamento da temperatura dia após dia de forma cumulativa ao longo do período desejado. Isso permite avaliar os resultados que teriam ocorrido caso um derivativo climático tivesse sido negociado com base nessa variável. Trabalhos como os de Henderson (2002) e Roustant, Laurent, Bay e Carraro (2003) utilizaram a modelagem diária de temperatura em suas análises.

Em um estudo conduzido por Cao e Wei (2004), foi utilizado o modelo de precificação de ativos de equilíbrio proposto por Lucas (1978), estendido para incorporar incertezas relacionadas à economia, geradas tanto pelo dividendo agregado quanto por uma variável de estado que representa as condições climáticas, ou seja, a temperatura. O modelo foi calibrado com dados de temperatura e consumo, e o preço de mercado do risco climático foi analisado e quantificado.

Os resultados indicaram que o prêmio de risco associado à variável de temperatura é significativo. Isso significa que o risco climático tem um impacto substancial no preço dos derivativos climáticos. A análise considerou o nível de aversão ao risco dos investidores e ajustou os parâmetros do processo de dividendo agregado de acordo com as condições empíricas da realidade. Com base nesses ajustes, ficou evidente que o prêmio de risco pode representar uma parcela significativa do preço do derivativo climático.

Essa pesquisa destaca a importância de compreender e quantificar o risco climático associado aos derivativos climáticos. Os resultados indicam que os investidores levam em consideração os riscos climáticos ao precificar esses instrumentos financeiros, o que tem implicações significativas para a gestão de riscos relacionados ao clima e à precificação de contratos climáticos.

2.4 Efetividade de *hedge* nos contratos de derivativos climáticos

A utilização de contratos de derivativos, por si só, não é suficiente para a mitigação eficaz de riscos. É fundamental estimar a razão ótima de *hedge*, ou seja, determinar a quantidade apropriada de contratos de derivativos a serem utilizados para proteger os ativos ou passivos de

um investidor, a fim de alcançar um equilíbrio entre a proteção contra riscos e o potencial de retorno (Amorim Neto, 2015).

No contexto da gestão do risco climático na produção de grãos em Marrocos, Stoppa e Hess (2003) exploraram o uso de derivativos vinculados a um indicador de pluviosidade acumulada. Eles construíram um indicador ponderando os períodos de crescimento das plantas e constataram que esse indicador foi capaz de explicar 92% da variabilidade da produtividade agrícola. Além disso, avaliaram a efetividade do *hedge*, ou seja, a capacidade de reduzir o risco relacionado ao clima. Eles descobriram que a opção construída com base nesse indicador conseguiu compensar parte significativa das perdas dos produtores devido à baixa precipitação.

A teoria tradicional de *hedge* tem suas raízes em trabalhos de economistas como Keynes (1930) e Hicks (1939), que o interpretavam como uma estratégia para diminuir o risco e fornecer proteção semelhante a um seguro. Nessa interpretação clássica, o *hedge*, geralmente avesso ao risco, transfere parte de seu risco para especuladores mais dispostos a assumi-lo. Porém, o conceito de *hedge* tem uma ampla gama de aplicações no mundo real, não se limitando apenas à redução de risco. Como mencionado por Paxson e Wood (2001), o *hedge* é usado por empresas e indivíduos como proteção contra incertezas. Ele pode servir para proteger contra variações no valor de ativos ou passivos denominados em moeda estrangeira ou administrar riscos, assumindo uma posição oposta a uma exposição original.

Em resumo, o uso eficaz de derivativos climáticos, como parte de estratégias de *hedge*, requer uma avaliação cuidadosa da quantidade adequada de contratos de derivativos a serem usados, levando em consideração os objetivos de proteção e a exposição ao risco climático. Isso ajuda a equilibrar os potenciais benefícios da proteção contra perdas com a exposição a movimentos favoráveis do clima.

Smith e Stulz (1985) desenvolveram uma teoria positiva sobre *hedge*, na qual há uma maximização no valor de empresas que incorporam o *hedge* como parte da estratégia de financiamento, definindo *hedge* como sendo a aquisição de ativos financeiros que reduzam a variância dos seus retornos. Com isso, os autores constataram que a utilização de *hedge* pelas firmas dá-se, majoritariamente, por três motivos: impostos, dificuldades financeiras e aversão ao risco dos administradores.

Nessa perspectiva, o *hedge* consiste em uma estratégia defensiva que tem como objetivo evitar o risco provocado pela variação de preços e taxas em determinadas posições assumidas ou futuras, mediante a compensação entre os resultados produzidos pelos itens objetos e os instrumentos financeiros utilizados na proteção (De Montreuil Carmona, Aquino, Paredes & Torres, 2014).

A abordagem tradicional para avaliar a eficácia de *hedge* é através do exame *ad hoc* dos valores R^2 resultantes de uma regressão de cobertura de variância mínima. A eficácia do *hedge* de variância mínima é mais comumente avaliada por meio de uma regressão de mínimos quadrados ordinários (OLS) da mudança no preço à vista como uma função linear da mudança no preço futuro (Leuthold, Junkus e Cordier, 1989), em que o R^2 resultante é a medida da eficácia da cobertura.

Sanders e Manfredo (2004) e Manfredo e Richards (2005) apresentam uma metodologia empírica, baseada no princípio abrangente, para se avaliarem contratos futuros alternativos em uma estrutura de eficácia de *hedge*. Ao fazerem isso, eles combinam cobertura de variância mínima e avaliação de previsão. Seu modelo parte da regressão OLS para estimar o índice de *hedge* de variância mínima:

$$\Delta CP_t = \alpha + \beta \Delta FP_t + e_t, \quad (4)$$

Em que ΔCP_t e ΔFP_t são as variações do preço à vista (CP) e do preço futuro (FP), respectivamente, no intervalo t . O R^2 da equação estimada (21) é uma medida de eficácia de cobertura.

Eles assumem que existem dois contratos futuros concorrentes disponíveis como:

$$\Delta CP_t = \alpha_0 + \beta_0 \Delta FP_t^0 + e_t^0 \quad (4a)$$

$$\text{e } \Delta CP_t = \alpha_1 + \beta_1 \Delta FP_t^1 + e_t^1, \quad (4b)$$

em que FP_t^0 é o contrato preferencial, FP_t^1 é o contrato concorrente, β_0 é o índice de *hedge* para o contrato preferencial e β_1 , o índice de *hedge* para o contrato concorrente, e_t^0 o risco de base residual para o contrato preferencial e e_t^1 é o risco de base residual para o contrato concorrente.

Para comparar o desempenho de cobertura de contratos futuros alternativos, Sanders e Manfredo (2004) derivaram um teste abrangente como:

$$e_t^0 = \varphi + \lambda(e_t^0 - e_t^1) + v_t, \quad (5)$$

Se a hipótese nula de que λ é igual a zero não for rejeitada, então, o contrato concorrente não proporciona redução no risco de base residual relativo ao contrato preferencial. Se a hipótese nula for rejeitada, então, tanto os contratos preferenciais quanto os concorrentes são considerados para posição de *hedge* efetiva. O novo índice de *hedge* ótimo para esta posição de

hedge composta é $\beta_0(1 - \lambda)$ para o contrato preferencial e $\beta_1\lambda$ para o contrato concorrente. Essa regressão abrangente fornece uma comparação fácil e direta da eficácia do *hedge* e do teste abrangente.

Para medir a efetividade do *hedge* ou a mudança na exposição ao risco através da compra de derivativos climáticos, Vedenov e Barnett (2004) e Woodard e Garcia (2008) utilizaram a raiz quadrada média da perda-*mean root square loss* (MRSL). A perda média da raiz quadrada é uma função simples da semivariância, que reflete o risco de queda, medindo apenas os desvios abaixo da média. Eles determinam o índice de *hedge* minimizando a semivariância de uma carteira composta por rendimentos e derivativos climáticos. Além disso, Vedenov e Barnett (2004) medem dois indicadores de risco adicionais, o valor em risco – *value at risk* (VaR) e o equivalente de certeza, para apoiar o seu resultado de efetividade de cobertura.

O estudo realizado por Richards *et al.* (2006) parece ter se concentrado em avaliar o custo e a efetividade do *hedge*, particularmente comparando as opções de insetos e as opções climáticas como ferramentas para controlar danos econômicos causados por diferentes fatores, como aumento da população de insetos e eventos climáticos adversos. Para essa avaliação, os autores utilizaram quatro indicadores de risco: equivalente de certeza, prêmio de risco, índice de Sharpe e valor em risco.

O equivalente de certeza é uma medida que avalia o valor esperado do contrato de *hedge*, o prêmio de risco mede a compensação pelo risco de preço, o índice de Sharpe é uma métrica que leva em consideração tanto o retorno quanto o risco, e o valor em risco é uma medida que avalia as perdas potenciais em um determinado nível de confiança e o risco de base se refere à possibilidade de que os pagamentos de um instrumento de *hedge* não correspondam às deficiências na exposição subjacente, o que pode resultar em ineficácia na cobertura.

Especificamente, o risco de base geográfica, que está relacionado à distância entre a estação meteorológica usada para derivativos climáticos e o local de exposição, é uma consideração importante. Controlar o risco de base geográfica é fundamental para tornar os derivativos climáticos uma ferramenta de *hedge* mais eficaz, garantindo-se que as condições climáticas medidas correspondam, com precisão, à exposição real dos agricultores ou empresas.

Spaulding *et al.* (2003) estudaram a eficiência da opção de venda no *hedge* da produção de milho e trigo na Romênia. A opção de venda climática na produção de milho na Suíça foi investigada por Torriani *et al.* (2008). Markovic e Jovanovic (2011) examinaram a eficácia do *hedge* de opção de venda na produção de cevada de inverno na Alemanha. Zara (2010) concluiu que o *hedge*, utilizando a estratégia *Strangle* resulta em uma volatilidade 22,06% menor do

valor econômico da produção de uva em relação ao valor econômico da produção de uva sem *hedge*.

O trabalho dos autores Berg, Schimitz, Starp, & Trenkel (2004) teve foco na produção de batatas da Alemanha, observando que, em situações em que a correlação entre o índice utilizado no derivativo e a produtividade da lavoura era menor que 0,6, a redução do risco climático do produtor era pequena. De igual modo, Musshoff, Odening & Xu (2011) investigaram o uso de opções de precipitação no nordeste da Alemanha, aplicando a análise para produção de trigo. Verificaram que a efetividade do *hedge* se reduzia à medida que a fazenda do produtor se distanciava da estação meteorológica de referência, dada a elevação do risco de base e a baixa relação entre o índice pluviométrico e a produtividade agrícola.

Pelka e Musshoff (2013) por sua vez, tomando como base a produção de trigo da região central da Alemanha, analisaram a efetividade de operações de *hedge* com contratos de opções de temperatura e precipitação. Os resultados apontaram que o uso desses derivativos teve alto potencial de redução do risco relativo às receitas dessa atividade.

A efetividade do *hedge* com derivativos de clima ainda foi objeto de estudo de Vedenov e Barnett (2004). Baseando-se nas principais praças produtoras de milho, algodão e soja dos Estados Unidos, os autores concluíram que a qualidade da proteção proporcionada pelos instrumentos varia conforme a região produtora e cultura analisada.

Assim, na tabela 1, podemos avaliar, de forma resumida, os principais estudos anteriores de derivativos climáticos no Brasil e em alguns países:

Tabela 1
Estudos anteriores

Autor	Ano	País	Objetivo	Resultado
Vedenov e Barnett	2004	Estados Unidos	Estudaram a efetividade do derivativo de clima na produção de milho, soja e algodão em duas regiões nos Estados Unidos. Ressaltam que a estrutura de <i>hedge</i> deve ser delineada para cada cultura e tipo de área geográfica.	Concluíram que aplicação de derivativos climáticos resultou em proteção de risco contra queda nos rendimentos das propriedades observadas.

Autor	Ano	País	Objetivo	Resultado
Rodrigues	2006	Brasil (Rio de Janeiro)	Apresentar metodologias para a modelagem e previsões da temperatura da cidade do Rio de Janeiro pelo uso de séries temporais, com foco na construção de um índice CDD para a cidade.	O estudo concluiu que os modelos de séries temporais são os mais adequados para a análise de precificação de contratos climáticos.
Cyr e Kusy	2007	Canadá	Investigar a potencial utilização de derivativos climáticos para <i>hedge</i> face ao risco de queda na produção de vinho em função da flutuação da temperatura na região estudada.	Os autores evidenciaram que a produção de vinho é fortemente dependente da temperatura mínima (-12 °C) e da sua amplitude [-12 °C; -8 °C].
Zara	2010	França	Investigou a eficácia dos derivativos climáticos na produção de uvas destinadas para a produção de vinho na França	Concluiu que a aplicação do instrumento foi capaz de reduzir, de forma eficaz, a volatilidade relacionada ao valor econômico da safra.
Markovic, Ivanovic e Pajic	2014	Sérvia	Analisar o efeito de <i>hedge</i> na produção de camomila na Sérvia, usando a opção de clima com base na quantidade de precipitação.	Concluíram que a utilização de derivativos de clima na região diminuiu as variações de parâmetros econômicos de sucesso (por exemplo, custos, receita e lucros). Consideraram, ainda, que há um potencial significativo dos derivativos climáticos na redução de riscos de produção.
Lemos	2014	Brasil	Desenvolveu um método com base em dados de 265 estações meteorológicas do Brasil, de 1970 a 2012, e são aplicados os métodos de Burning Cost e de Modelagem do Índice para a precificação dos contratos climáticos.	Em geral, o estudo aponta um viés nos dados simulados em relação aos dados históricos, e concluiu-se que os principais problemas no estudo de precificação de contratos climáticos referem-se à qualidade e à consistência dos dados climáticos no Brasil.
Raucci <i>et al</i>	2018	Brasil	Avaliaram o uso de opções de venda pluviométricas na gestão do risco de produção de soja no Rio Grande do Sul.	Com o uso do método de modelagem de índice, aplicando-se dois índices, a adoção dos contratos reduziu a variabilidade da receita por hectare em aproximadamente 30%, sem redução significativa da receita média.

Autor	Ano	País	Objetivo	Resultado
Alves neto	2021	Brasil	Buscou identificar se a aplicabilidade dos derivativos climáticos é eficaz no Mato Grosso e se possuem efetividade de <i>hedge</i> para a soja.	O autor constatou que a implantação do derivativo climático para a soja no estado é viável e eficaz e que, quanto maior a aversão ao risco do agente, menor o preço do derivativo; além disso, as variáveis temperatura e pluviosidade respondem de formas diferentes à precificação utilizada.

3 METODOLOGIA

Neste tópico, apresentam-se os procedimentos metodológicos utilizados para se alcançarem os objetivos propostos neste estudo.

3.1 Classificação da pesquisa

De acordo com Martins e Theóphilo (2009), as pesquisas quantitativas são aquelas em que os dados e as evidências coletados podem ser quantificados e mensurados. A abordagem metodológica que mais se adequa ao objeto deste estudo é a abordagem quantitativa, que se utiliza de dados numéricos e instrumental estatístico/econométrico.

A pesquisa descritiva apresenta-se como escopo ao fazer a exposição das características do objeto de estudo, considerando que as informações observadas, analisadas e interpretadas não podem ser elementos de quaisquer interferências do pesquisador (Vergara, 2000; Lakatos & Marconi, 2010). Sendo assim, quanto aos objetivos, esta pesquisa se classifica como descritiva, pois pretende registrar e interpretar tanto a precificação de um derivativo climático quanto como o mercado do agronegócio se comporta diante da viabilidade desse tipo de derivativo. Com isso, pretende-se conhecer a precificação do derivativo climático no Brasil, levantar os dados meteorológicos e identificar possíveis limitações ainda não descobertas pelo pouco estudo que se tem na literatura atualmente.

3.2 Amostra e dados

O estudo será amparado pelos métodos utilizados por Vedenov e Barnett (2004), Cao e Wei (2004), Richards, Mafredo e Sanders (2004) e Alves Neto (2021), em estudos que buscaram compreender e apresentar a precificação de derivativos climáticos.

Os dados iniciais utilizados neste estudo serão disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a base de dados contará com informações divulgadas diariamente e possuem as seguintes variáveis: precipitação total (*Pt*), pressão atmosférica média (*Pam*),

temperatura máxima diária (T_{maxd}), temperatura mínima diária (T_{mind}), temperatura média diária (T_{med}) e umidade média relativa do ar (U_{rel}). Essas variáveis serão colhidas de 602 estações meteorológicas durante o período compreendido entre 01/01/2000 e 31/12/2021, período escolhido pelo fato de o primeiro contrato de derivativo ter sido negociado no fim da década de 90. Assim, considerar-se-á o período inicial do derivativo climático e esta análise termina com o último dia da base de dados de produção do IBGE. Outra justificativa é que Cao, Li e Wei (2003) demonstraram que a decisão de quantos anos incluir na análise pode ter um grande efeito nos valores obtidos, com uma variação de mais de 300% entre o uso de 10 e 20 anos de dados históricos.

Nesse contexto, após a coleta preliminar da base de dados, definiu-se a amostra de estados que serão analisados, utilizando-se, para isso, as informações disponibilizadas pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). A tabela 2 representa as informações extraídas do 7º levantamento de produção da safra 2022/23, disponibilizado pela Companhia, sendo possível identificar os estados que compõem a amostra estudada para cada uma das três culturas estudadas — soja, milho e café — escolhidas pela representatividade no cenário nacional: soja – o Brasil é o maior produtor e exportador de soja no mundo, ocupando 50% do comércio mundial (Embrapa, 2021); milho – o Brasil é o terceiro maior exportador mundial de milho, atrás dos Estados Unidos e da Argentina (Conab, 2023); e café – no que tange à sua cultura, a safra brasileira teve recorde em 2022, segundo o boletim de acompanhamento da safra brasileira (Conab, 2023).

Para a soja e o milho, foram escolhidos os estados com produção estimada (milhões/kg) acima de 14.000; quanto ao café, os dados de produção disponibilizados pela CONAB se referem ao primeiro levantamento da produção de 2023 e foram selecionados os estados com produção estimada (milhões/sc.) acima de 3.000.

Tabela 2
Produção estimada para as culturas de soja, milho e café no Brasil

Soja		
Estado	Cidade	Produção mil kg
Mato Grosso	Sorriso-MT	44.476,4
Paraná	Cascavel-PR	22.300,7
Goiás	Rio Verde-GO	17.634,8
Rio Grande do Sul	Tupanciretã-RS	14.513,0
Milho		
Estado	Cidade	Produção mil kg
Mato Grosso	Lucas do Rio Verde-MT	46.237,5
Paraná	Toledo-PR	18.728,5

Goiás	Rio Verde-GO	12.587,4
Mato Grosso do Sul	Maracaju-MS	11.237,7
Café		
Estado	Cidade	Produção mil sc
Minas Gerais	Patrocínio-MG	27.941,9
Espírito Santo	Brejetuba-ES	14.553,0
São Paulo	Divinolândia-SP	4.723,0
Bahia	Barra do Choça-BA	3.624,0

Nota: a produção foi estimada para o ano de 2023, segundo a CONAB.

3.3 Descrição das etapas

A primeira etapa consiste na estimação da produção de soja, milho e café de um produtor representativo nas cidades brasileiras com maior estimativa de produção para o ano de 2023, conforme representado na tabela 2. Essa estimativa foi feita com auxílio do método empregado por Vedenov e Barnett (2004), o qual tem como premissa que o nível de produção de uma certa cultura é função dos acontecimentos climáticos em sua região. Ou seja, a estimação da produção das três culturas estudadas, estão sob forte influência do meio climático em que estão inseridas, tornando-se a temperatura uma variável indispensável.

Após a estimação da produção, a segunda etapa consistiu na formulação de um índice climático aplicado para precificar os contratos de derivativos climáticos, baseado na Temperatura média diária (T_{med}), variável disponibilizada pelo banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram coletadas as variáveis disponíveis no banco de dados das estações meteorológicas, conforme tabela 3 abaixo.

Tabela 3
Variáveis coletas das bases meteorológicas do INMET

Cidade	Pt	Pam	Tmaxd	Tmind	Tmed	Urel
Sorriso-MT	x	x	x	x	x	x
Cascavel-PR	x	x		x	x	x
Rio Verde-GO	x	x	x	x	x	x
Tupanciretã-RS	x	x	x	x	x	x
Lucas do Rio Verde-MT						
Toledo-PR	x		x	x	x	x
Maracaju-MS	x	x	x	x	x	x
Patrocínio-MG	x	x	x	x	x	x
Brejetuba-ES						
Divinolândia-SP						
Barra do Choça-BA						

Na Tabela 3, observou-se um conjunto de cidades da amostra inicial, de relevância para essa pesquisa, sendo que algumas delas não dispunham de bases de dados de estações

meteorológicas próprias. Diante dessa carência, adotou-se uma abordagem que se mostrou imperativa para a continuidade da análise. Foi necessário recorrer às bases de dados de cidades próximas, uma prática que se fundamenta na observação empírica de que, frequentemente, as condições climáticas em localidades geograficamente próximas tendem a ser substancialmente semelhantes.

Esse procedimento, no entanto, não foi arbitrário. O trabalho limitou-se a uma faixa de proximidade de aproximadamente 80 quilômetros, escolha que respalda as premissas estabelecidas pela comunidade científica e reforçada por Vedenov e Barnett (2004). Conforme destacado pelos autores, fenômenos climáticos, como a ocorrência de chuvas, muitas vezes manifestam-se de maneira altamente localizada. Mesmo a distância aparentemente modesta entre a estação de medição meteorológica e a área de cultivo pode acarretar disparidades drásticas entre as perdas efetivamente incorridas e os retornos derivados das condições climáticas.

Sendo assim, após análise geográfica da área, identificaram-se as bases de cidades próximas, o que está demonstrado na tabela 4, podendo-se observar qual estação meteorológica foi utilizada para formalizar o índice de cada cidade sem estação própria.

Tabela 4
Cidade amostra x Estação meteorológica e distância entre as cidades

Cidade	Estação meteorológica	Distância
Lucas do Rio Verde-MT	Sorriso-MT	67 Km
Brejetuba-ES	Afonso Cláudio-ES	33 Km
Divinolândia-SP	Caldas-MG	59 Km
Barra do Choça-BA	Vitória da Conquista-BA	30 Km
Mal. Candido Rondon – PR	Cascavel e Toledo-PR	70 Km

Após definida a amostra, as variáveis e realizada a coleta de dados, iniciou-se a terceira etapa, que consistiu no processo de precificação do contrato de derivativo climático para cada uma das culturas analisadas. O processo de precificação foi realizado em comparativo entre três modelos frequentemente utilizados na literatura, modelo de equilíbrio (Cao & Wei, 2004), modelo de Monte Carlo (Alaton, Djehiche e Stillberger, 2002) e método *Burn Analysis* (Lee e Craine, 2012), descritos na subseção 3.6 deste estudo. O processo de precificação será utilizado para se verificar a efetividade e definir qual melhor modelo para o agronegócio brasileiro.

A quarta e última etapa representa a formulação de duas variáveis que se derivam das estimações realizadas nos passos anteriores, sendo a renda de um produtor que não utiliza o contrato climático e outra que será a renda do produtor que utiliza contrato de derivativo

climático. A formulação dessas duas variáveis propicia a comparação da efetividade do uso de derivativo climático pelos produtores das culturas estudadas nas cidades de amostra deste estudo.

O resumo das etapas que se seguirão consta na tabela 5 abaixo:

Tabela 5
Descrição das etapas de execução

Etapa	Descrição
1ª Etapa	Estimação da produção de soja, milho e café de um produtor representativo nas cidades brasileiras com maior estimativa de produção para o ano de 2023.
2ª Etapa	Formulação de um índice climático que será aplicado para precificar os contratos de derivativos climáticos, baseado na Temperatura média diária (Tmed).
3ª Etapa	Consiste no processo de precificação do contrato de derivativo climático para cada uma das culturas analisadas. O processo de precificação será feito em comparativo entre três modelos frequentemente utilizados na literatura: modelo de equilíbrio (Cao & Wei, 2004), modelo de Monte Carlo (Alaton, Djehiche e Stillberger, 2002) e método <i>Burn Analysis</i> (Jewson & Brix, 2005).
4ª Etapa	Formulação de duas variáveis que se derivam das estimações realizadas nos passos anteriores, para se verificar a efetividade do uso de derivativos climáticos no agronegócio brasileiro.

3.4 Estimação do nível de produção da soja, milho e café

Nesta seção, o estudo utiliza um modelo desenvolvido por Vedenov e Barnett (2004) para projetar o rendimento de *commodities*, como soja, milho e café. O modelo baseia-se no uso de variáveis climáticas, incluindo temperatura e pluviosidade, como fatores independentes para prever o rendimento dessas culturas. O modelo é uma regressão simples, no qual o rendimento é expresso como uma função dessas variáveis climáticas e de erros não observados. Para lidar com tendências temporais comuns em análises temporais, o estudo emprega um processo de acomodação das tendências por meio de um modelo log-linear.

Vedenov e Barnett (2004) desenvolveram um modelo que propunha a projeção do rendimento de *commodities* aplicando as variáveis de temperatura e pluviosidade como fatores independentes. Para os autores, o modelo possuía abrangência de efeitos climáticos e qualquer outro efeito representado pelo erro (ε) que poderiam impactar no rendimento, correlacionados ou não. Assim, o modelo de regressão simples dado pelos autores é o seguinte:

$$Y_t = \beta + f(W_t) + \varepsilon_t, \quad (6)$$

em que Y_t se refere ao rendimento no tempo t , W_t é o vetor de variáveis climáticas, ε_t representa os efeitos de outras variáveis desconhecidas sobre o rendimento e $E[\varepsilon_t] = 0$.

Nos casos de análises temporais, é comum a presença de tendência temporal, por isso, os autores sugerem que seja feito um processo de acomodação de tendência dos dados utilizando-se um modelo log-linear:

$$\log(Y_t^{tr}) = \beta_0 + \beta_1(t - \text{ano base}), \quad (7)$$

em que Y_t^{tr} se refere ao rendimento no tempo t e o ano base se trata do último ano da série empregada, que, neste estudo, é o ano de 2022.

Em seguida, será utilizada a seguinte expressão:

$$Y_t^{det} = Y_t \frac{Y_t^{tr}}{Y_{\text{ano base}}^{tr}}, \quad (8)$$

em que Y_t^{det} se refere ao rendimento no tempo t , subtraída a tendência temporal.

$$Rev_t = pY_{t,k}^{det}, \quad t = 1, \dots, T, \quad k = 1, 2, 3 \quad (9)$$

em que Rev é a simulação histórica dos rendimentos, aplicando-se o método de Monte Carlo, p é o preço da *commodity*.

3.5 Modelo de simulação dos dados de temperatura

Nesta parte, o estudo aborda a modelagem da temperatura diária, que desempenha um papel crucial na análise dos contratos de derivativos climáticos. A temperatura diária é uma variável que varia de acordo com as estações, mas tende a se aproximar de uma média de longo prazo.

Sendo assim, discute-se que as mudanças na temperatura diária são mais voláteis no inverno do que no verão, o que leva à aplicação de um modelo denominado “Movimento Geométrico Browniano” (MGB) para representar essas variações. O MGB é um modelo estocástico, usado para simular as incertezas nas variáveis climáticas. A seção descreve detalhadamente como os dados de temperatura são simulados e ajustados para a análise subsequente dos contratos de derivativos climáticos.

A temperatura diária varia de uma maneira relativamente bem compreendida na maioria dos casos. Essa temperatura varia de acordo com a estação, mas tende a se reverter para uma média de longo prazo, com a crescente mudança climática. Além disso, segundo Richards, Manfredo e Sanders (2004), as mudanças na temperatura de dia para dia não são totalmente controladas. Ou seja, a temperatura tende a ser mais volátil no inverno que no verão (Cao &

Wei, 2004), enquanto mudanças bruscas de temperatura são mais a regra do que a exceção, levando, assim, para um Movimento Geométrico Browniano (MGB).

Portanto, para a modelagem do índice climático, é necessário a simulação de dados de temperatura. Frequentemente, na literatura, o Movimento Geométrico Browniano (MGB) é utilizado como modelo estocástico para modelar as variáveis incertas de um estudo (Paddock, Siegel & Smith, 1988). Por isso, Cao e Wei (2004) e Richards, Manfredo e Sanders (2004) apresentaram um modelo estocástico a partir do modelo Browniano com reversão a média e saltos log-normais, com volatilidade variável no tempo, representado por:

$$dw_t = k(\alpha_w(w_t, t) - \lambda\phi - w_t)dt + h_t(w_t, t)dz + \phi dq, \quad (10)$$

em que w_t é a temperatura média em grau Celsius, k é a taxa média de reversão (*rate of mean reversion*), α_w é a média instantânea do modelo; h_t é o desvio padrão, dz é definido com as propriedades: $E(dz) = 0$ e $E(dz^2) = dt$.

Já os saltos discretos na temperatura, ocorrem de acordo com o modelo de Poisson q com taxa média, λ é a taxa média do processo Poisson, ϕ é a faixa de percentual aleatório, que possui a seguinte distribuição log-normal: $\ln(1 + \phi) \sim N(\gamma - 0.5\delta^2, \delta^2)$ em que δ^2 é a variância do componente de salto. O processo de Poisson citado é assim distribuído:

$$dq = \begin{bmatrix} 0 & \text{Com probabilidade } 1 - \lambda dt \\ 1 & \text{Com probabilidade } \lambda dt \end{bmatrix} \quad (11)$$

A contabilização de saltos discretos na série meteorológica dessa maneira é relativamente comum na variação da flutuação do preço de ações (Merton, 1983; Ball & Torous, 1985), mas também é apropriado para temperaturas (Richards, Manfredo e Sanders, 2004).

Para acomodar as flutuações sazonais no nível e na volatilidade da temperatura, a média e a variância da equação (4), são especificadas as funções de temperatura e tempo. Sazonalidade, autorregressão e tendência são retirados da série de temperatura, definindo sua média incondicional, conforme abaixo:

$$\alpha_w(w_t, t) = \gamma_0 + \gamma_1 \text{seno} \left(\frac{2\pi t}{365} \right) + \gamma_2 \text{cosseno} \left(\frac{2\pi t}{365} \right) + \gamma_3 t + \sum_{j=1}^p \rho_j w_t - j, \quad (12)$$

em que t é a variável tempo, mensurada em dias ($t = 1, 2, \dots, 365$) e ρ (número de *lags* da autorregressão) é escolhido segundo o critério de Schwarz.

Os parâmetros $(k, \sigma, \lambda, \theta, \delta)$ do processo (4) são estimados por máxima verossimilhança. A função log-verossimilhança é assim expressa:

$$\begin{aligned}
 L(w|\beta) &= -T\lambda - \frac{T}{2}\ln(2\pi) \\
 &+ \sum_{t=1}^T \ln \left[\sum_{n=0}^N \frac{\lambda^n}{n!} \frac{1}{\sqrt{\sigma^2 + \delta^2 n}} \exp\left(\frac{-(dw_t(k(a_w(w_{t,t}) - w_t) - \lambda\theta))^2}{2(\sigma^2 + \delta^2 n)}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{13}$$

em que T é o total de observações da série temporal e N é o número de pulos (*jumps*) suficientes para incluir todos os potenciais *jumps* nos dados observados.

3.6 Índice climático no agronegócio brasileiro

Após a simulação de dados de temperatura, será formulado o índice climático que será utilizado como métrica de proteção por parte do produtor. O índice climático se trata de uma métrica empregada para expressar o comportamento de uma variável climática (Jewson & Brix, 2005). Neste estudo, a princípio, pretende-se utilizar dois índices, o *Cooling Degree Days* (CDD) e o *Heating Degree Days* (HDD), visto que o estudo se faz presente em mais de uma região brasileira, com climas diferentes.

Segundo Jones (2007), os índices consistem na análise de graus-dia a partir de uma temperatura base, expressando a necessidade de resfriamento ou aquecimento de um dado local.

O índice CDD pode ser assim expresso:

$$CDD = T_m - T_b, \tag{14}$$

em que, T_b é a temperatura base, a qual será representada na tabela 6, ao final desta subseção 3.3, e T_m representa a temperatura média diária.

Como este estudo pretende viabilizar a precificação de um contrato de derivativo por x dias, o índice CDD será calculado de forma cumulativa, conforme a expressão:

$$ACDD = \sum_{j=1}^N (CDD_j) \begin{cases} \text{Se, } T_m > T_b \text{ então } CDD = T_m - T_b, \\ \text{Se não, } CDD = 0 \end{cases}, \tag{15}$$

em que N é definido como o período em dias.

Através do mesmo raciocínio exemplificado acima, o índice HDD é representado por:

$$HDD = T_b - T_m, \quad (16)$$

E, para análise de um determinado período, faz-se necessário acumular os dados do índice representado por:

$$AHDD = \sum_{j=1}^N (HDD_j) \begin{cases} \text{Se, } T_m < T_b \text{ então } HDD = T_b - T_m, \\ \text{Se não, } HDD = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

Segundo Pereira *et al.* (2002), a taxa de desenvolvimento de uma cultura está relacionada à temperatura do meio. Para isso, pressupõe-se a existência de uma temperatura basal inferior, abaixo da qual a planta não se desenvolve. Sendo assim, para que a cultura atinja uma de suas fases fenológicas ou a maturação, é necessário que se acumule a constante térmica, que é definida como o total de graus-dia (GD) acumulados durante o período de vida da cultura.

Por isso, a fim de compor as informações básicas para se definir o índice climático, foi definida, através da literatura, a temperatura base de cada uma das três culturas analisadas neste estudo, conforme tabela 6 abaixo:

Tabela 6
Temperatura basal das culturas deste estudo

Cultura	Temperatura base	Temperatura ótima	Autores
Soja	14 graus °C	20 e 30 °C	Silva <i>et al.</i> , 2020
Milho	10 graus °C	24 e 30 °C	Caron <i>et al.</i> , 2017
Cafê	16 graus °C	17 e 23 °C	Pérez-Soto <i>et al.</i> , 2015

3.7 Precificação do derivativo climático

O mercado de derivativos climáticos consiste em um exemplo típico de mercado incompleto, porque a variável temperatura, não é negociável (Alaton *et al.*, 2002). Por isso, devem-se estimar os parâmetros citados na subseção anterior para se precificar um contrato de derivativo climático. Com a simulação dos dados de temperatura e a definição dos parâmetros que serão utilizados para construir os índices *Cooling Degree Days* (CDD) e o *Heating Degree Days* (HDD), inicia-se a etapa de precificação do derivativo climático.

A precificação será feita de três formas diferentes, a saber:

- a) Método de Monte Carlo (Alaton, Djehiche e Stillberger, 2002);
- b) Modelo de equilíbrio (Cao & Wei, 2004); e

c) Método de *Burning Analysis* (Jewson & Brix, 2005).

O modelo de Monte Carlo é uma ferramenta poderosa na resolução de diversos problemas, especialmente na área de finanças (Diethelm, Ford, Freed & Luchko 2005). Neste estudo, o método será utilizado para precificar os derivativos climáticos, em que o processo será iniciado determinando-se a distribuição de probabilidade para o índice de temperatura e pluviosidade como: *weibull*, normal, *gamma*, log-normal, exponencial e logística. Sendo assim, depois de determinada a distribuição, serão simulados os índices climáticos que serão utilizados no modelo (Hoornaert, 2018).

Então, o *payoff* esperado poderá ser calculado por:

$$E[g(x(t))] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x(t)), \quad (18)$$

em que $g(x(t))$ é a expressão de *payoff* e $x(t)$ é o índice climático simulado;

$$g(x(t)) = \text{Max}(x(t) - K; 0) \text{ para um call} \quad (19)$$

$$g(x(t)) = \text{Max}(k - x(t); 0) \text{ para um put}, \quad (20)$$

em que K é valor de *strike*.

Logo, a expressão final pode ser dada por:

$$V_p = e^{vT} E[g(x(t))] \quad (21)$$

Já o modelo de equilíbrio de preços apresentado por Cao e Wei (2004), será utilizado neste estudo por se tratar de um modelo mais robusto de preços para o derivativo climático, envolvendo o nível de aversão ao risco do produto como uma variável na formulação do preço do contrato. Portanto, o modelo de equilíbrio de preços terá a temperatura como variável fundamental, caracterizada pelos índices *Cooling Degree Days* (CDD) e *Heating Degree Days* (HDD). Esse modelo teve como objetivo maximizar o valor presente da utilidade esperada do produtor e a precificação foi formulada a partir da esperança do valor de recompensa ao se expirar o contrato.

Destarte, a condição de equilíbrio implica que o total de consumo é igual ao dividendo agregado, e, no período t , o preço reivindicado é igual ao *payoff* (qr) no tempo futuro T , denotado por $X(t, T)$.

$$X(t, T) = \frac{1}{U_c(\delta_{tt})} E_t(U_c(\delta_T, T)qr), \quad \forall t \in (0, T), \quad (22)$$

em que $U_c(\delta_{tt})$ é a primeira derivada da função de utilidade $c_t: U(c_t, T)$ no T -ésimo período, sendo que o produtor tem preferência de risco caracterizada pelo nível constante aversão ao risco.

$$U(c_t, t) = e^{-pt} \frac{c_t^{y+1}}{y+1}, \quad (23)$$

em que p é a taxa de preferência ($p > 0$), y é o risco ($y \in (0, \infty)$) e c_t o consumo ($c_t: U(c_t, T)$).

O terceiro método utilizado no processo de precificação do contrato de derivativo será o de *Burning Analysis*. De acordo com Jewson e Brix (2005), a análise *Burning Analysis* é baseada na hipótese de expectativas racionais, ou seja, o método consiste no cálculo simplificado do *payoff* esperado de uma opção climática, pautada no *payoff* médio da variável climática. O *payoff* esperado, então, pode ser calculado por:

$$E_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i, \quad (24)$$

em que p_i é o *payoff* no ano i ;

$$p_i = \text{Max}(S_i - K; 0) \text{ para um call}, \quad (25)$$

$$p_i = \text{Max}(k - S_i; 0) \text{ para um put}, \quad (26)$$

em que S_i é o índice utilizado para a análise e K é o valor de *strike*.

Com isso, a expressão final é dada por:

$$V_p = e^{vT} E_p \quad (27)$$

em que v é a taxa livre de riscos e T é o tempo de maturidade do contrato.

3.8 Efetividade do uso de derivativos climáticos

A última etapa deste estudo foi mensurar as métricas que apresentam a efetividade do uso do derivativo, ou seja, a performance do contrato segue a premissa de que estes são

utilizados por um produtor que decide mitigar sua exposição ao risco (Vedenov e Barnett, 2004). Com isso, para se medir o desempenho de gerenciamento ou a redução de risco ao se utilizar o derivativo climático, foi realizada uma comparação entre o rendimento de um produtor que utiliza o derivativo frente a um que não o utiliza.

Para cumprir com tal objetivo, foram utilizadas três métricas: raiz quadrada da perda média – *mean root square loss* (MRSL), valor em risco – *Value at Risk* (VaR) e equivalente de certeza das receitas – *certainty-equivalente revenues* (CERs). O método MRSL se refere a uma análise de *hedge*, comparando-se a receita de um produtor que utiliza derivativo climático com a de um que não utiliza.

O método *mean root square loss* é ilustrado como:

$$MRSL_{sem} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [\max(p\bar{Y} - Rev_t, 0)]^2}, \quad (28)$$

$$MRSL_{com} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [\max(p\bar{Y} - Rev'_t, 0)]^2}, \quad (29)$$

em que \bar{Y} é a média da variável de produção $Y_{t,k}^{det}$.

Já a métrica *value at risk*, é a mensuração do risco que determina a probabilidade de perda de parte da receita a partir de um determinado nível de confiança estatística ($\alpha\%$ ⁴⁵), conforme fórmula abaixo:

$$\Pr\{Rev < VaR_\alpha\} = \alpha, \quad (30)$$

em que Rev é a simulação histórica dos rendimentos, aplicando-se o método de Monte Carlo.

Por fim, o terceiro método de análise de efetividade é o *certainty-equivalente revenues* (CERs), definido de acordo com Babcock, Choi e Fernerman (1993), como a quantia mínima de valor recebido para que o produtor seja indiferente entre receber esse valor ou arriscar um retorno mais alto no futuro. Conforme função de utilidade exponencial negativa:

$$u(Rev) = 1 - e^{(-\varphi Rev)}, \quad (31)$$

em que o parâmetro de risco (φ) é calibrado de forma separada para cada distribuição de rendimento corresponde a um dado prêmio de risco θ .

A partir disso, a análise foi realizada como apresentada por Woodard e Garcia (2008) e Alves neto (2021):

O rendimento sem utilização do contrato poderá ser calculado por:

$$Rev_t = pY_{t,k}^{det}, \quad t = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, \quad (32)$$

O rendimento utilizando-se o contrato será calculado por:

$$Rev'_t = pY_{t,k}^{det} + I(x, T, X), \quad t = 1, 2, \dots, \quad k = 1, 2, 3, \quad (33)$$

em que p é o preço da *commodity* empregada, I é a indenização do contrato e V , o preço do uso do contrato.

O valor esperado dos rendimentos $E[Rev]$ com e sem derivativo climático foram calculados utilizando-se a simulação histórica dos rendimentos a partir do método de Monte Carlo das expressões (25) e (26), e, para o valor de risco (θ), o parâmetro φ será computado numericamente a partir da igualdade entre a utilidade esperada do rendimento e a utilidade do rendimento garantido $(1 - \theta) E[Rev]$:

$$E(u(Rev)) = E_{Rev}[1 - e^{(-\varphi Rev)}] = 1 - e^{(-\varphi(1-\theta)E[Rev])} = u((1 - \theta)E[Rev]), \quad (34)$$

A partir das equações (24) e (27), a equivalente certeza das receitas será dada por:

$$u(CER_{sem}) = E_{Rev}(u(Rev)) \text{ e } u(CER_{com}) = E_{Rev}(u(Rev')). \quad (35)$$

Com isso, foi testada as hipóteses de efetividade de *hedge* para as três culturas estudadas nas regiões da amostra, utilizando-se as três métricas apresentadas acima, sendo:

H₁: a utilização do derivativo climático com objetivo de *hedge* é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Barra do Choça-BA.

H₂: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Divinolândia-SP.

H₃: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Brejetuba-ES.

H₄: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Patrocínio-MG.

H_5 : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Lucas do Rio Verde- MT.

H_6 : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Toledo-PR.

H_7 : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Rio Verde-GO.

H_8 : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Maracaju-MS.

H_9 : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Sorriso-MT.

H_{10} : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Cascavel-PR.

H_{11} : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Rio Verde-GO.

H_{12} : a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Tupanciretã-RS.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico, serão apresentados os resultados dos modelos utilizados, para que se possa discursar em torno da produção, da estrutura do contrato de derivativo climático e dos diferentes modos de precificação e, além disso, de conectar os resultados com a literatura sobre o tema e responder às hipóteses levantadas.

4.1 Estatísticas descritivas

As estatísticas descritivas foram ordenadas a fim de identificar a relação entre o tipo de cultura e a estação meteorológica utilizada. Sendo assim, é possível perceber que as estações que possuem maior rendimento da produção de café possuem ligeiramente temperaturas máximas menores, comparadas com as de maior produção de milho e soja.

A base de dados do INMET utilizada neste estudo evidencia falhas na medição, trazendo falta de dados à amostra (a_T). Com isso, foi realizada a acomodação dos dados e a exclusão da falta de medição dos dados da amostra (w_T). As tabelas abaixo representam os resultados das estatísticas realizadas.

Tabela 7
Estatísticas descritivas das temperaturas médias da cultura do café

Estatística	Vitória da Conquista-BA		Caldas-MG		Afonso Claudio-ES		Patrocínio-MG	
	a_T	w_T	a_T	w_T	a_T	w_T	a_T	w_T
Tamanho da amostra	5.329	4.639	5.514	5.406	3.753	3.236	5.612	5.237
Média	17,79	20,44	17,65	18,00	19,18	22,25	19,24	20,61
Variância	51,46	5,03	16,19	10,17	65,12	7,33	31,73	5,61
Máximo	27,61	27,61	24,60	24,60	34,67	34,67	27,25	27,25
Mínimo	0	13,90	0	6,76	0	14,29	0	11,40
Skewness	-1,84	-0,26	-1,78	-0,60	-1,69	0,24	-2,55	-0,38
Kurtosis	4,99	2,47	8,15	2,52	4,55	3,10	9,21	2,91
Jarque-Bera (JB)	0	0	0	0	0	0	0	0
Augmented Dickey-Fuller (ADF)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Durbin Watson (DW)	1,06	0,95	1,43	0,58	1,06	0,89	0,52	0,88

Tabela 8
Estatísticas descritivas das temperaturas médias da cultura do milho

Estatística	Sorriso-MT		Mal. Candido Rondon-PR		Rio Verde-GO		Maracaju-MS	
	a_T	w_T	a_T	w_T	a_T	w_T	a_T	w_T
Tamanho da amostra	6.957	5.641	5.524	5.132	5.344	4.309	5.497	4.269
Média	20,94	25,82	20,20	21,74	18,56	23,01	17,69	22,78
Variância	104,72	3,00	47,52	17,61	87,15	5,50	101,13	14,23
Máximo	31,63	31,63	31,60	31,60	31,08	31,08	31,42	31,42
Mínimo	0	15,49	0	4,95	0	10,91	0	6,73
Skewness	-1,50	-0,26	-1,73	-0,90	-1,37	-0,48	-0,99	-0,97
Kurtosis	3,39	4,47	5,65	3,75	3,14	5,16	2,34	3,88
Jarque-Bera (JB)	0	0	0	0	0	0	0	0
Augmented Dickey-Fuller (ADF)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Durbin Watson (DW)	0,73	2,42	1,09	1,05	0,34	1,75	0,74	1,22

Tabela 9
Estatísticas descritivas das temperaturas médias da cultura da soja

Estatística	Sorriso-MT		Mal. Candido Rondon-PR		Rio Verde-GO		Tupanciretã- RS	
	a_T	w_T	a_T	w_T	a_T	w_T	a_T	w_T
Tamanho da Amostra	6.957	5.641	5.524	5.132	5.344	4.309	1.970	1.943
Média	20,94	25,82	20,20	21,74	18,56	23,01	18,47	18,73
Variância	104,72	3,00	47,52	17,61	87,15	5,50	28,74	24,33
Máximo	31,63	31,63	31,60	31,60	31,08	31,08	30,09	30,09
Mínimo	0	15,49	0	4,95	0	10,91	0	2,04
Skewness	-1,50	-0,26	-1,73	-0,90	-1,37	-0,48	-0,89	-0,58
Kurtosis	3,39	4,47	5,65	3,75	3,14	5,16	3,93	2,92
Jarque-Bera (JB)	0	0	0	0	0	0	0	0
Augmented Dickey-Fuller (ADF)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Durbin Watson (DW)	0,73	2,42	1,09	1,05	0,34	1,75	1,07	1,08

No que diz respeito às estatísticas descritivas, é notável uma redução nos dados da amostra, resultado da eliminação das observações faltantes. Essa depuração dos dados contribuiu para a redução da variabilidade das temperaturas, resultando, assim, em uma distribuição mais uniforme. Além disso, a medida de assimetria das temperaturas apresenta uma tendência à diminuição após essa depuração, e a curtose se aproxima de um padrão próximo ao da distribuição normal.

Adicionalmente, vale observar que os valores do teste de Durbin-Watson (DW) se mantiveram próximos de 2, indicando a ausência de autocorrelação nos resíduos. Em todas as estações, os resultados do teste Augmented Dickey-Fuller apontaram um valor-p aproximando-se de 0.01, o que sugere a estacionariedade dos conjuntos de dados.

Para se demonstrar as falhas meteorológicas e a sazonalidade das temperaturas, foram elaborados os gráficos referentes às séries históricas de temperatura. As figuras podem ser observadas abaixo.

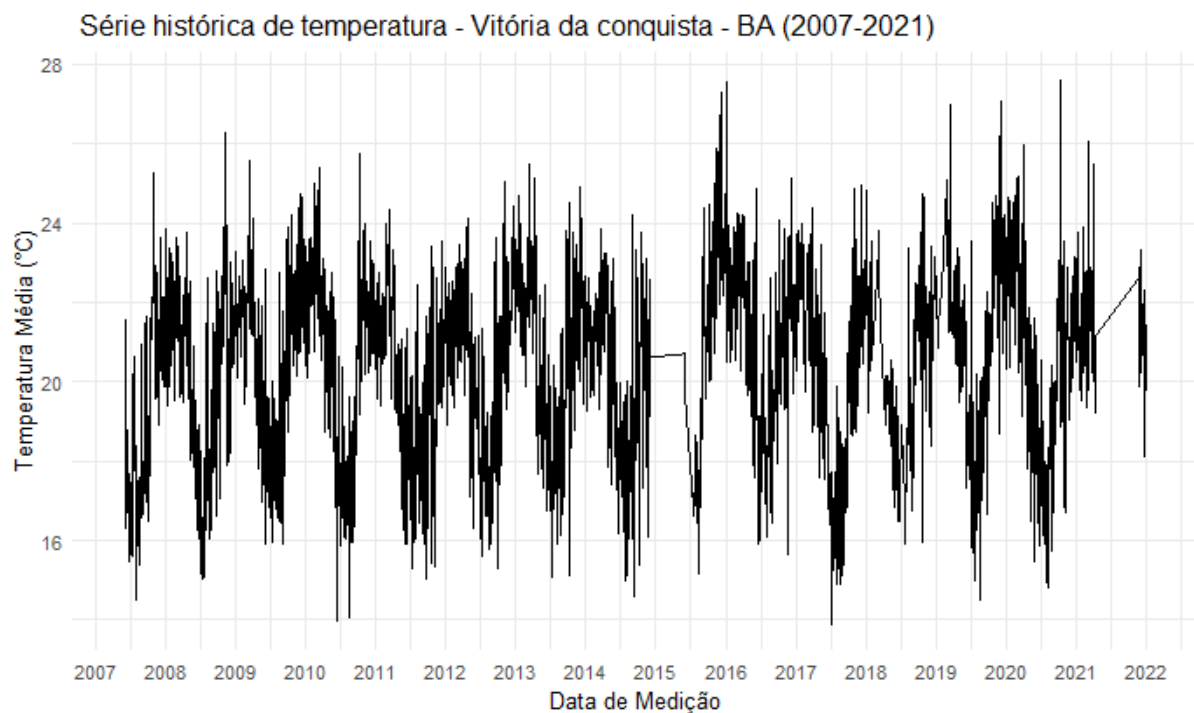


Figura 1 - Série histórica da temperatura diária em Vitória da Conquista-BA

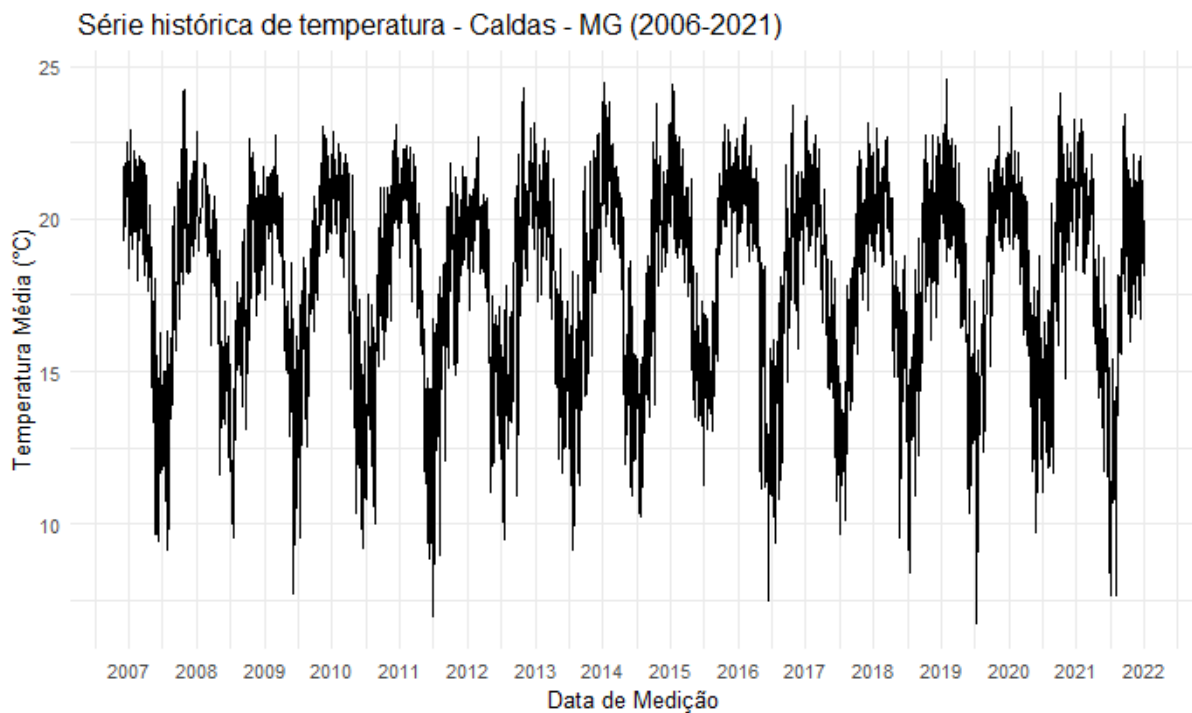


Figura 2 - Série histórica da temperatura diária em Caldas-MG

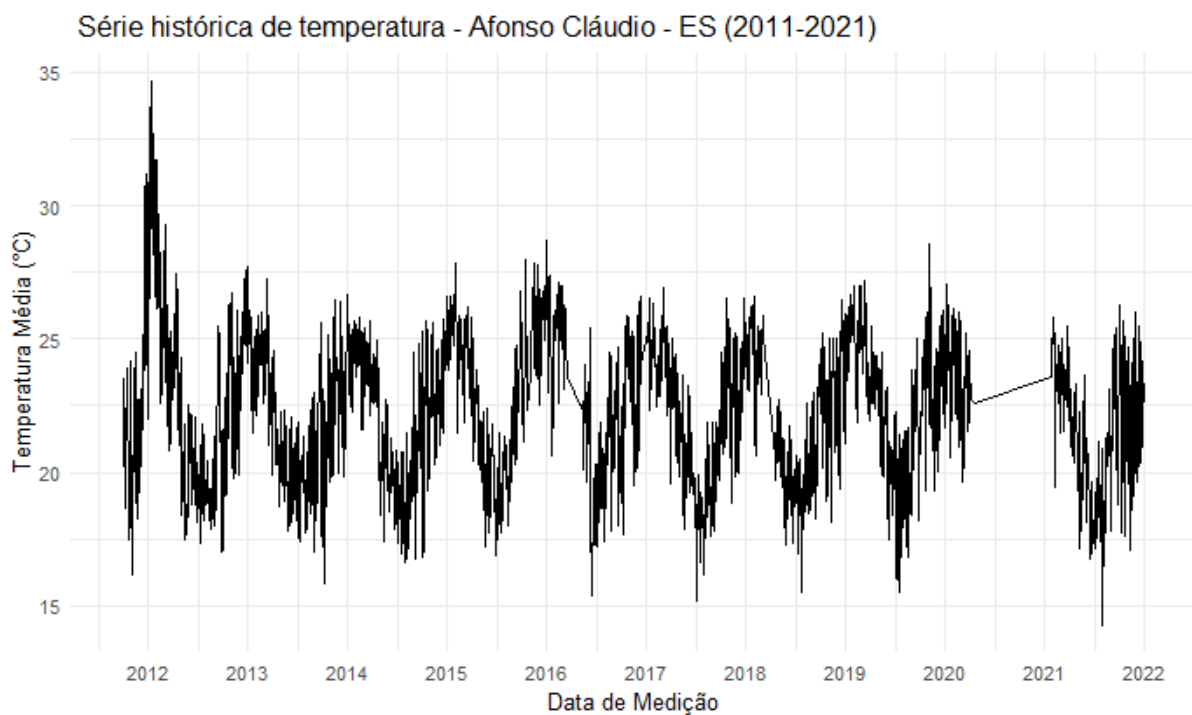


Figura 3 - Série histórica da temperatura diária em Afonso Cláudio-ES

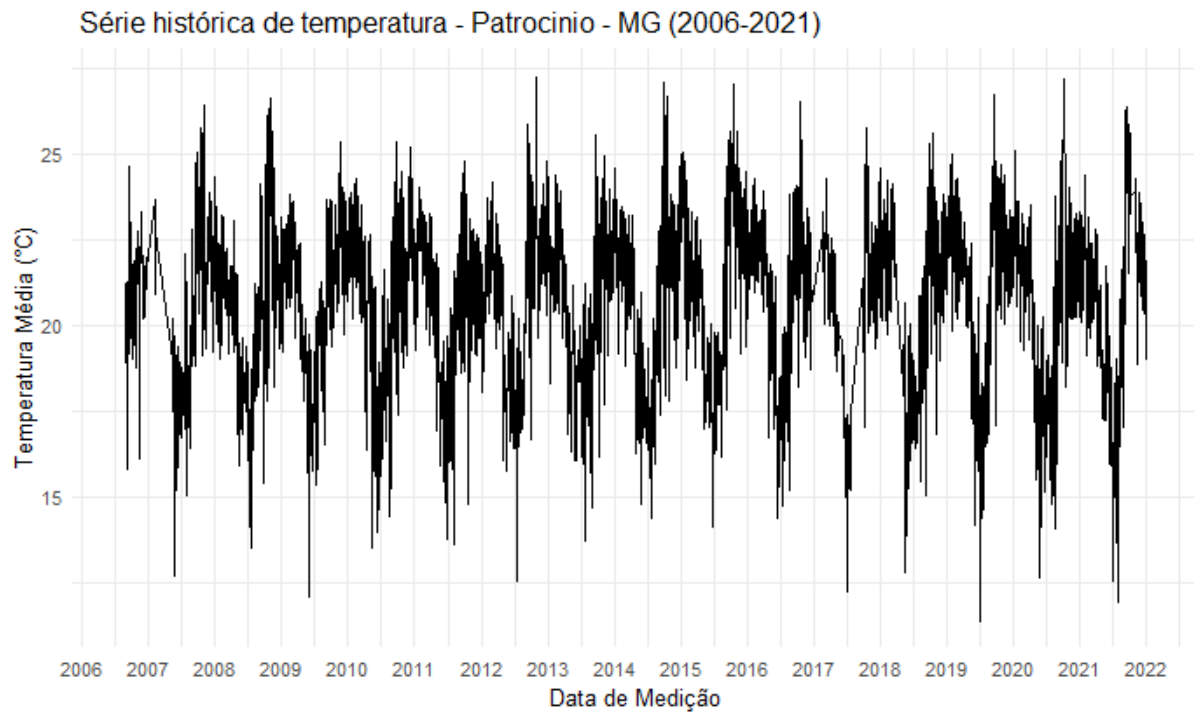


Figura 4 - Série histórica da temperatura diária em Patrocínio-MG

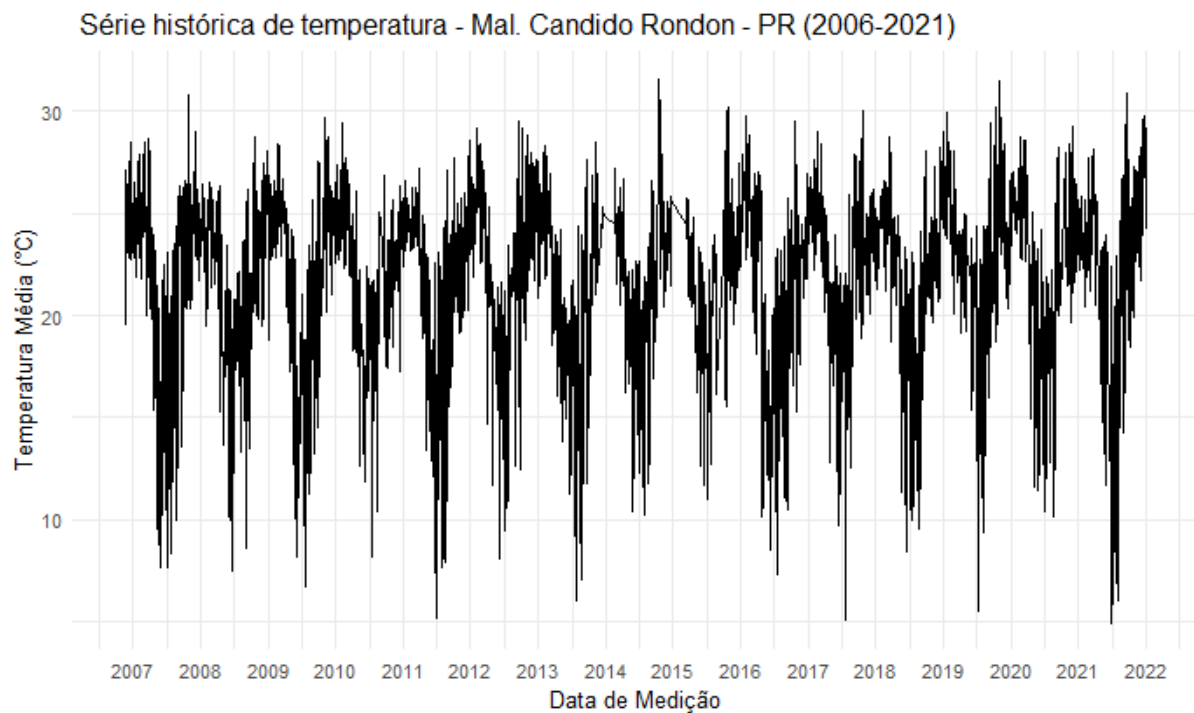


Figura 5 - Série histórica da temperatura diária em Mal. Cândido Rondon-PR

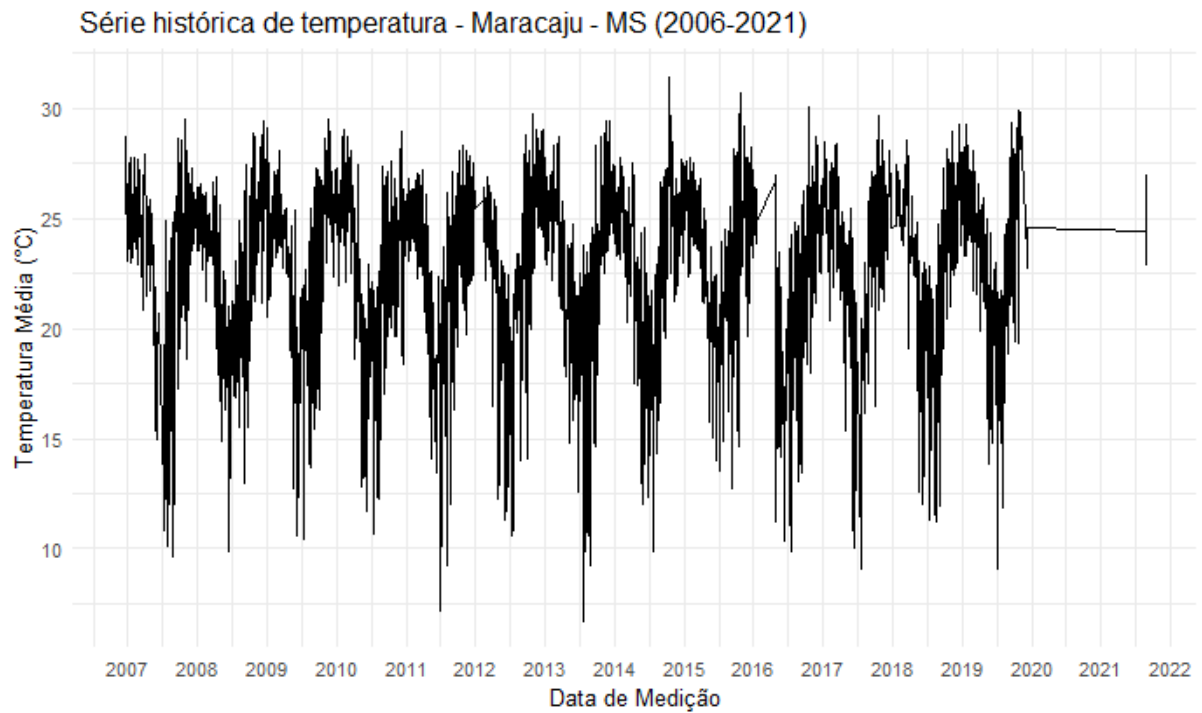


Figura 6 - Série histórica da temperatura diária em Maracaju-MS

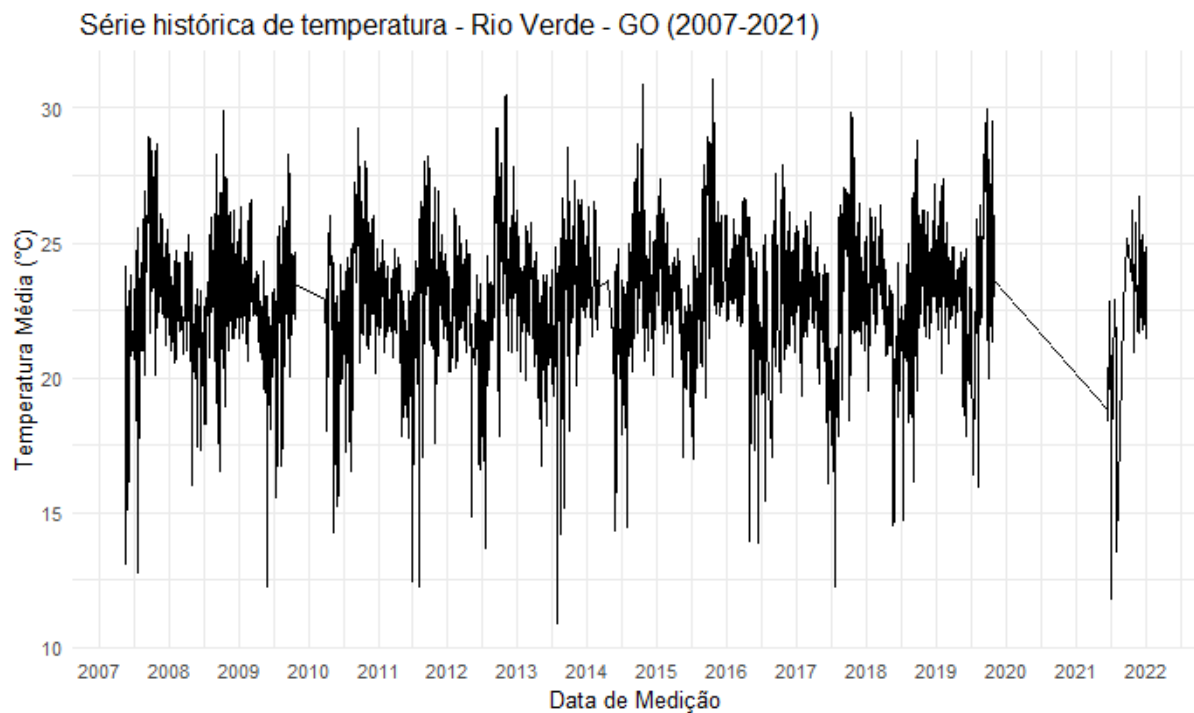


Figura 7 - Série histórica da temperatura diária em Rio Verde-GO

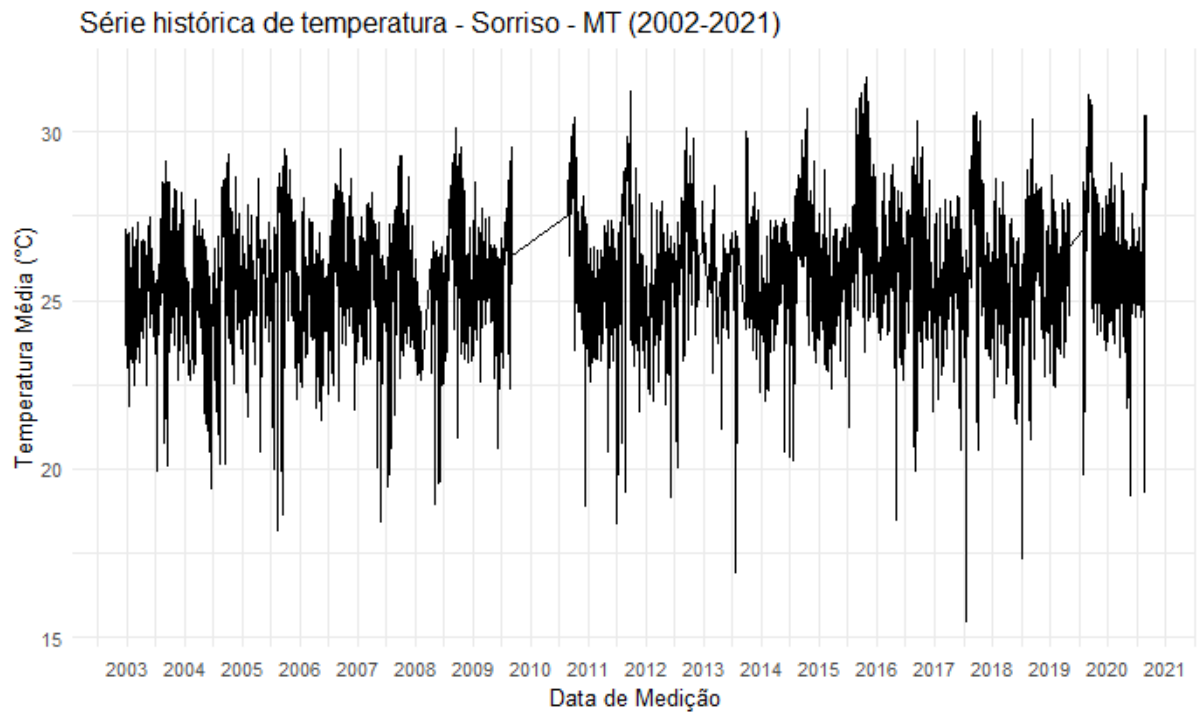


Figura 8 - Série histórica da temperatura diária em Sorriso-MT

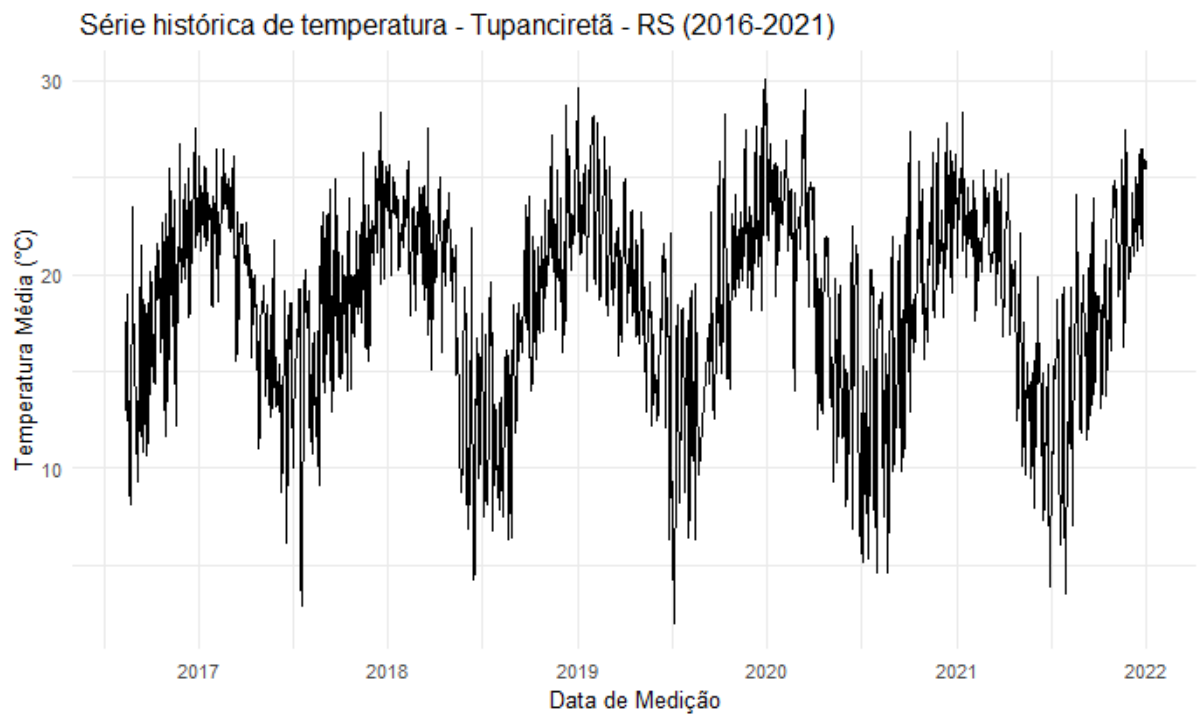


Figura 9 - Série histórica da temperatura diária em Tupanciretã-RS

4.2 Estimação da produção

Após apresentação das estatísticas descritivas, iniciou-se o processo de análise e estimativa de produção de café, milho e soja nas respectivas cidades analisadas. Abaixo, estão os gráficos correspondentes à produção histórica nessas regiões. Apesar de a produção sofrer quedas durante o período analisado, de uma forma geral, é possível observar uma crescente evolução na produção. Entretanto, analisando-se os gráficos, é possível perceber que a produção não é apenas crescente, ela conta com picos mais baixos durante todo o período e pesquisas futuras podem abordar esse tema.

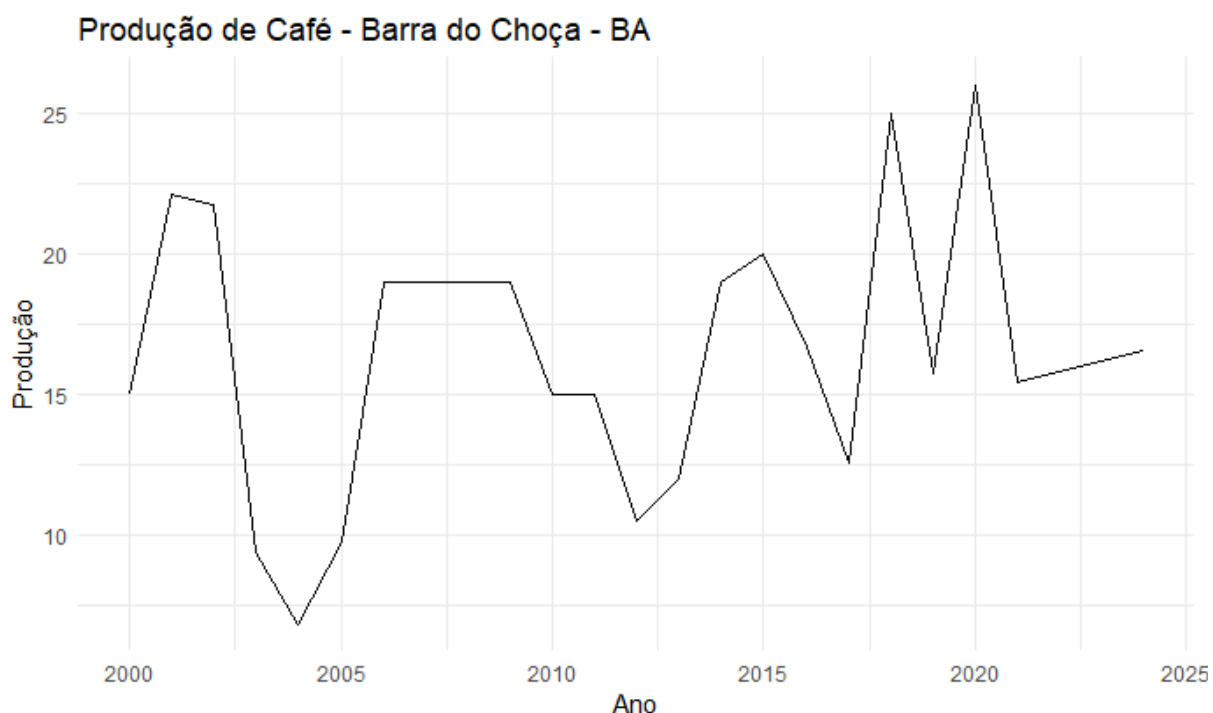


Figura 10 - Série histórica da produção de café em Barra do Choça-BA

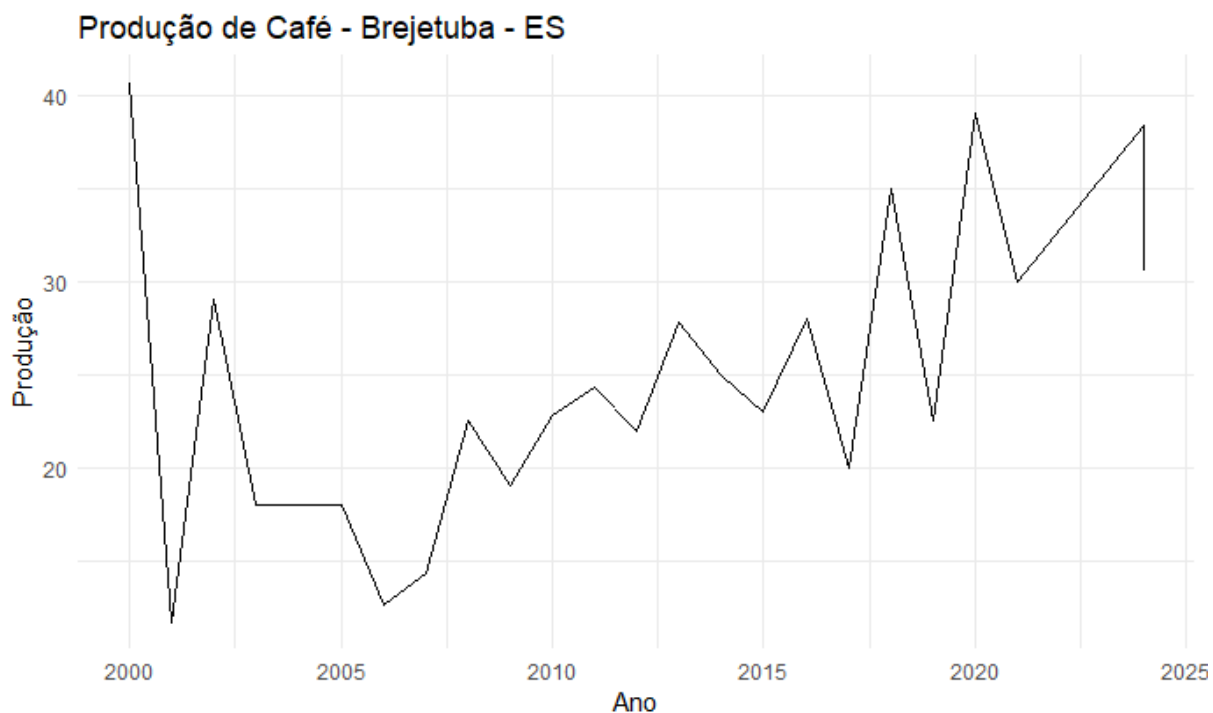


Figura 11 - Série histórica da produção de café em Brejetuba-ES

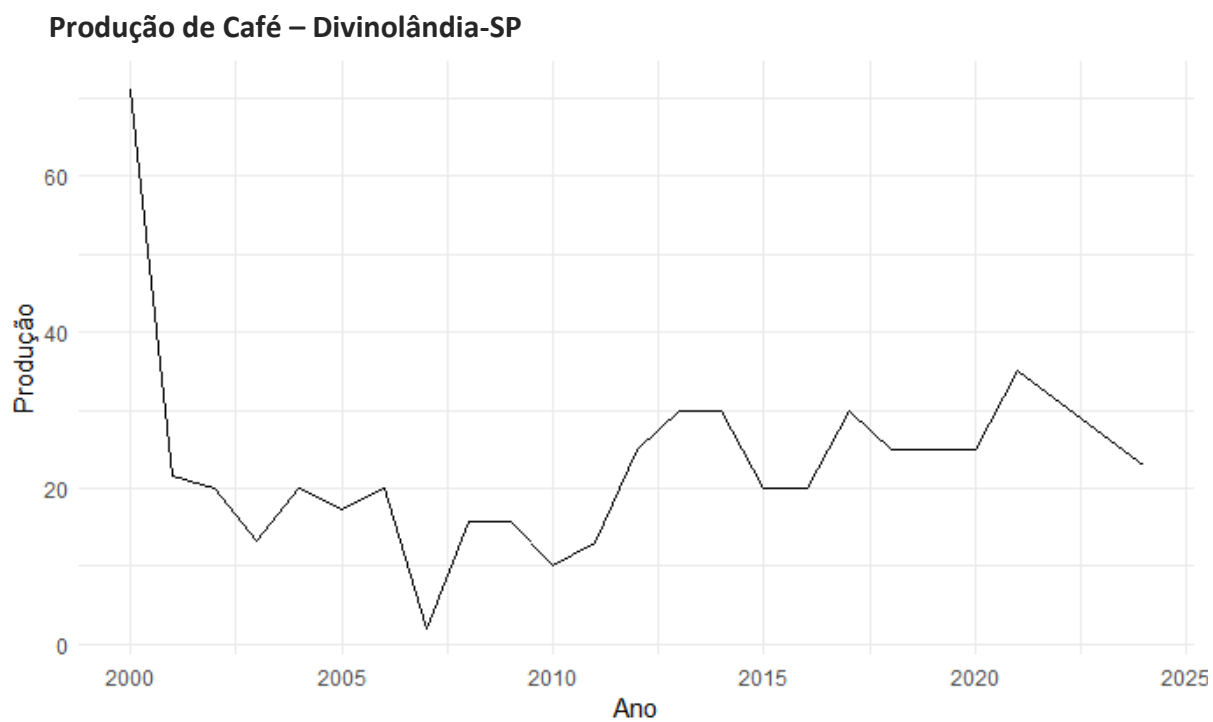


Figura 12 - Série histórica da produção de café em Divinolândia-SP

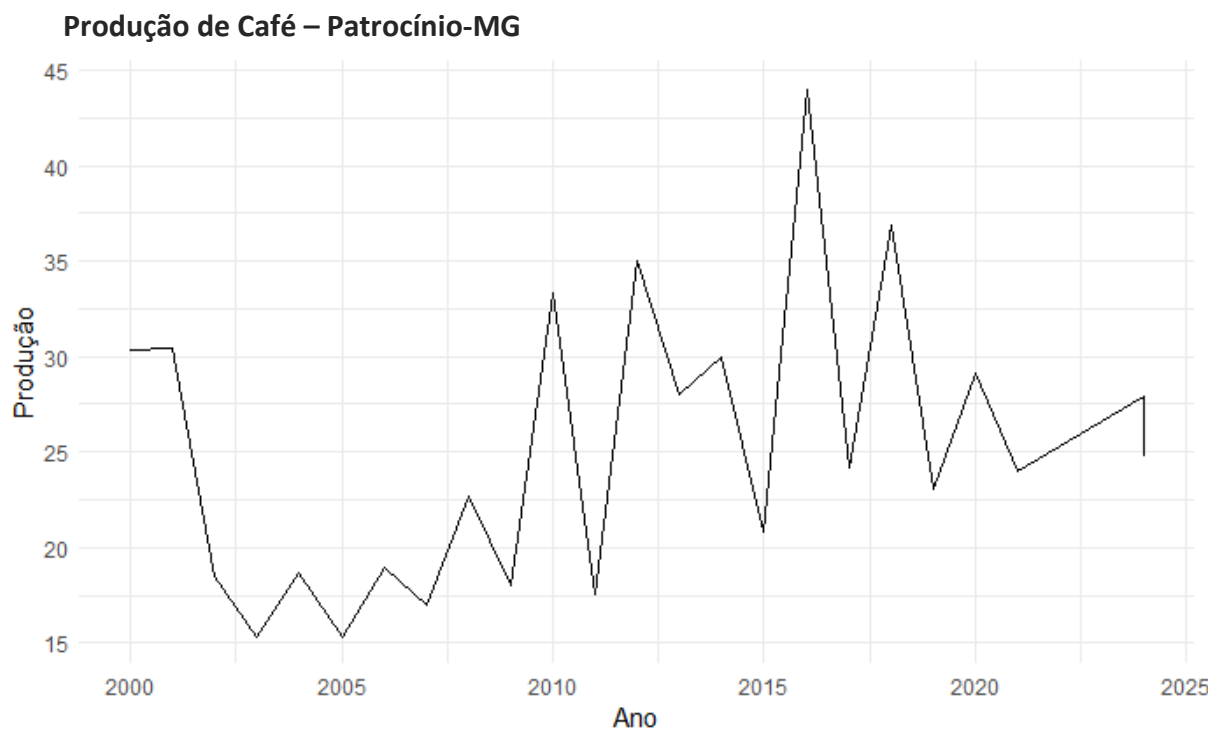


Figura 13 - Série histórica da produção de café em Patrocínio-MG

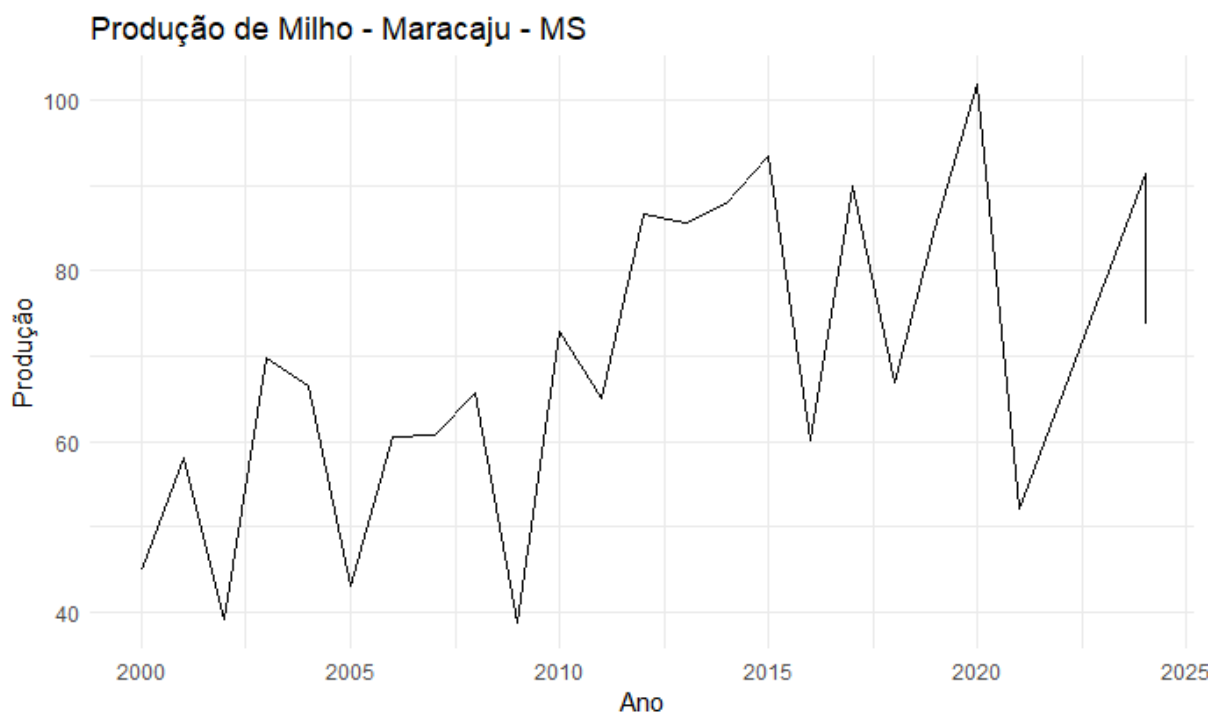


Figura 14 - Série histórica da produção de milho em Maracaju-MS

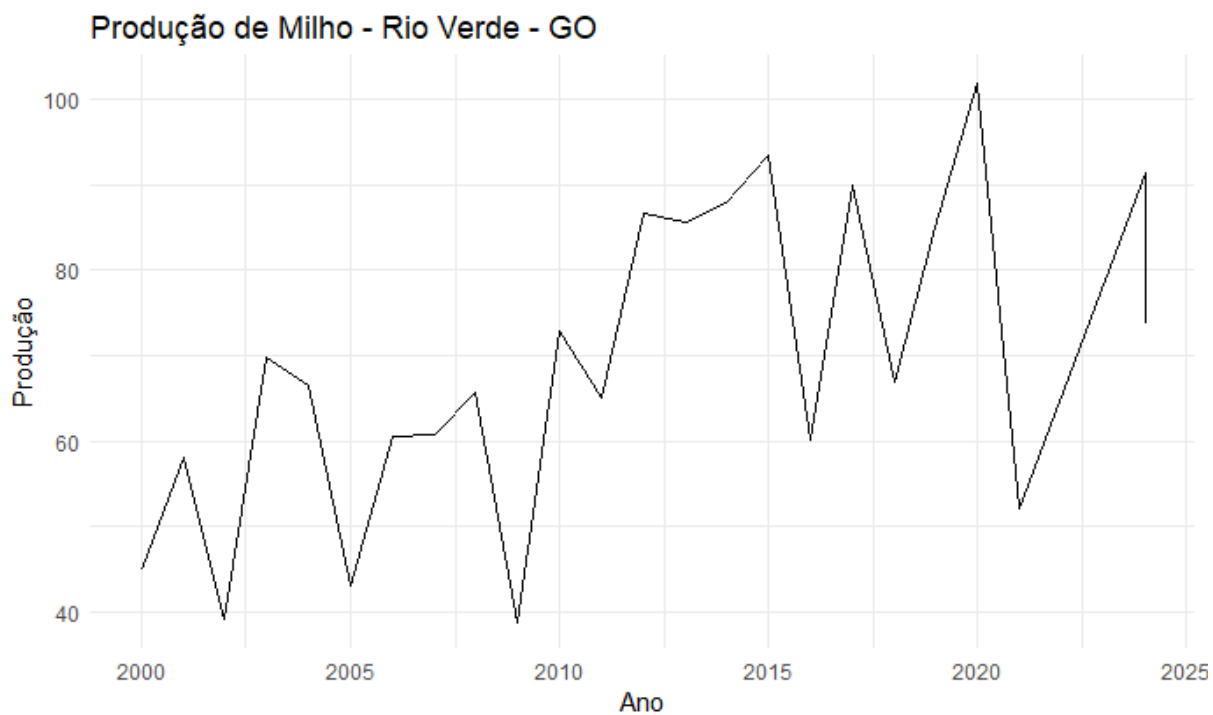


Figura 15 - Série histórica da produção de milho em Rio Verde-GO

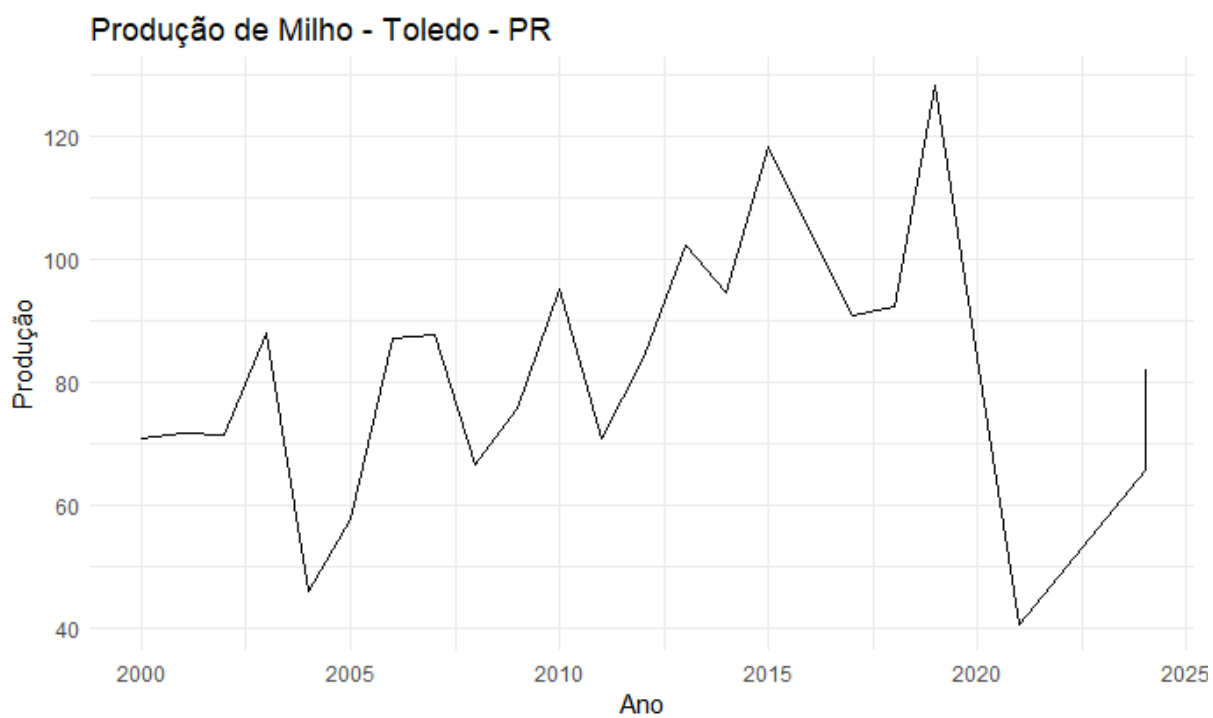


Figura 16 - Série histórica da produção de milho em Toledo-PR

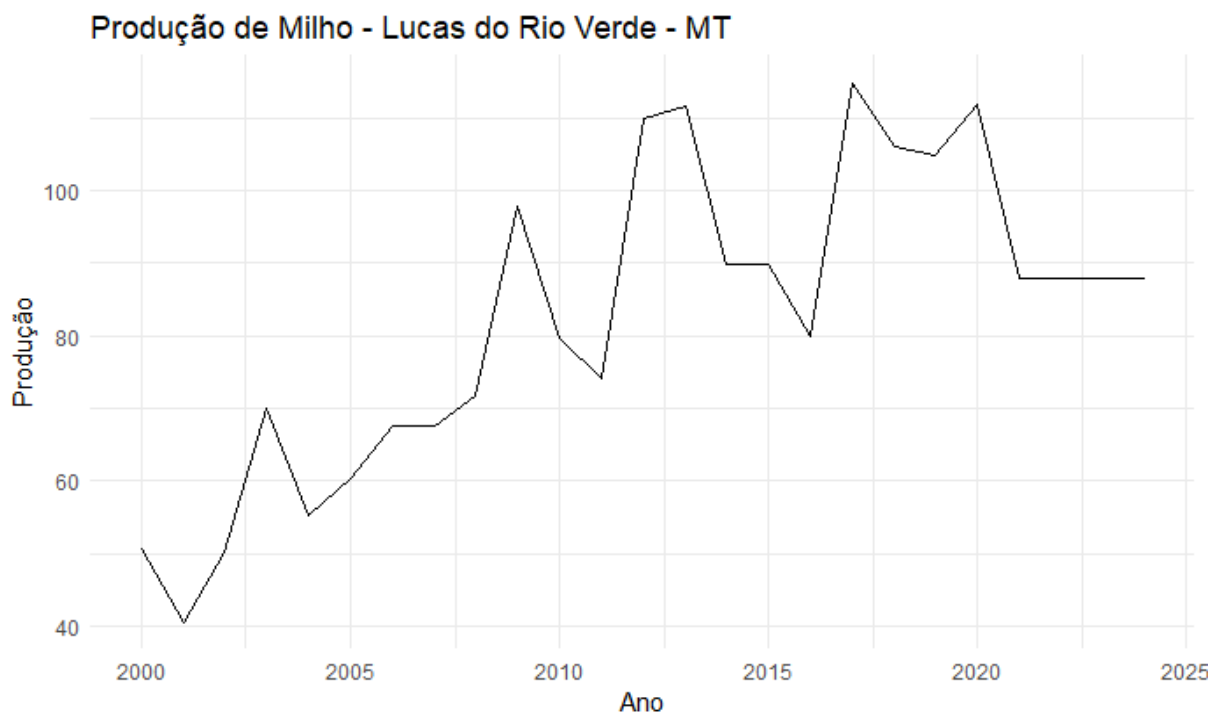


Figura 17 - Série histórica da produção de milho em Lucas do Rio Verde-MT

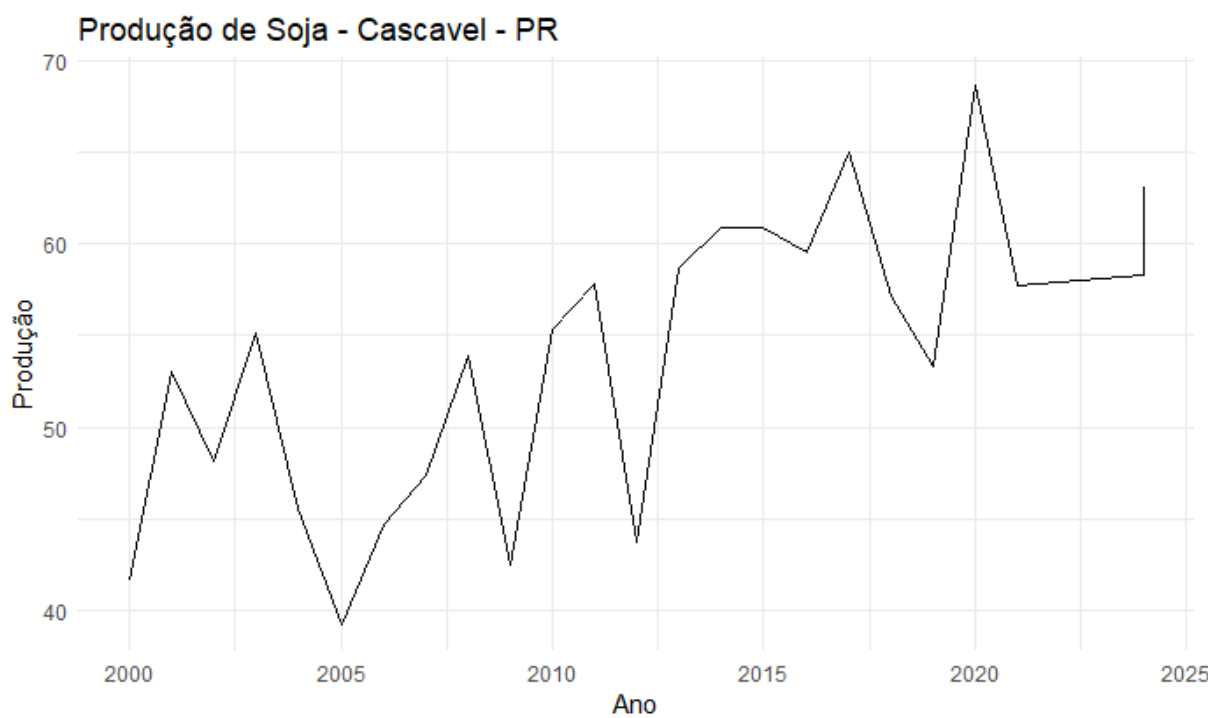


Figura 18 - Série histórica da produção de soja em Cascavel-PR

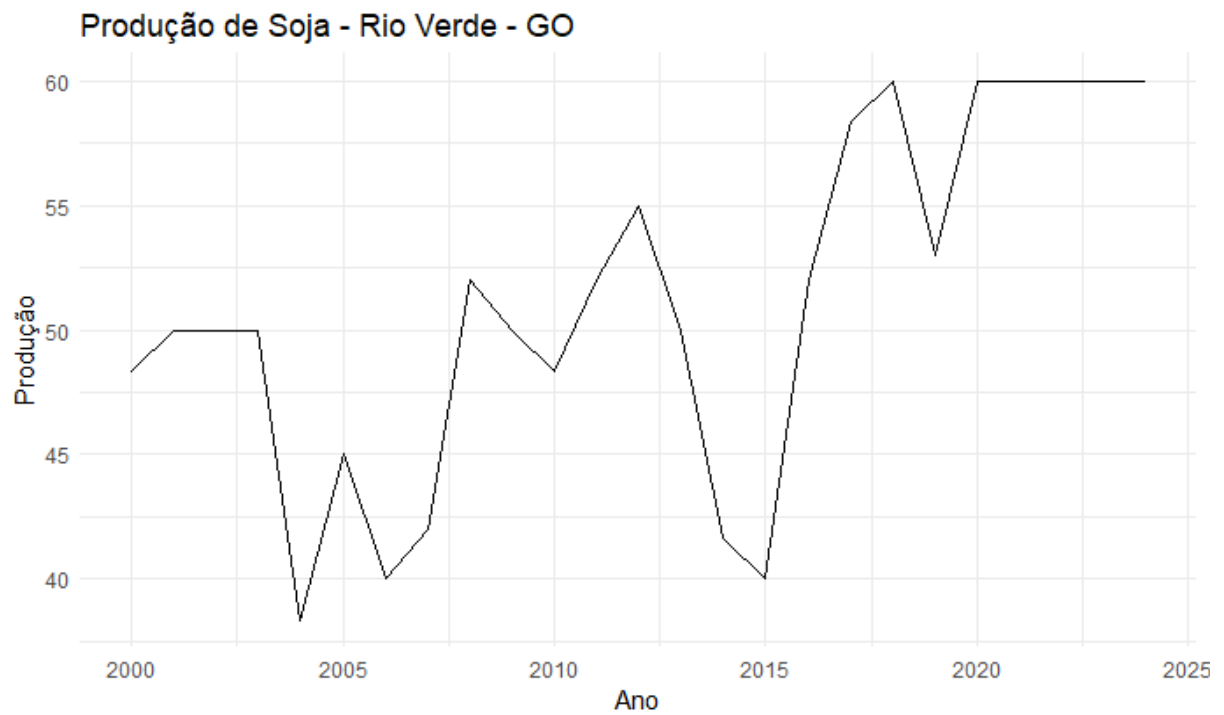


Figura 19 - Série histórica da produção de soja em Rio Verde-GO

fi

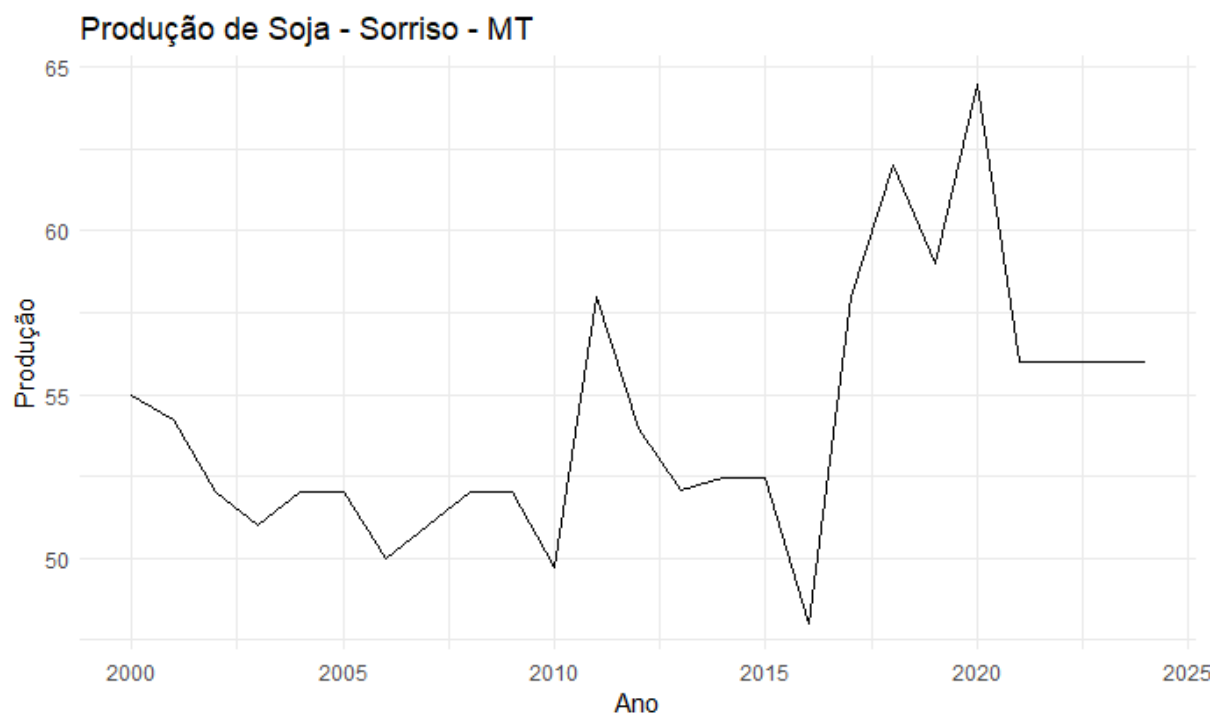


Figura 20 - Série histórica da produção de soja em Sorriso-MT

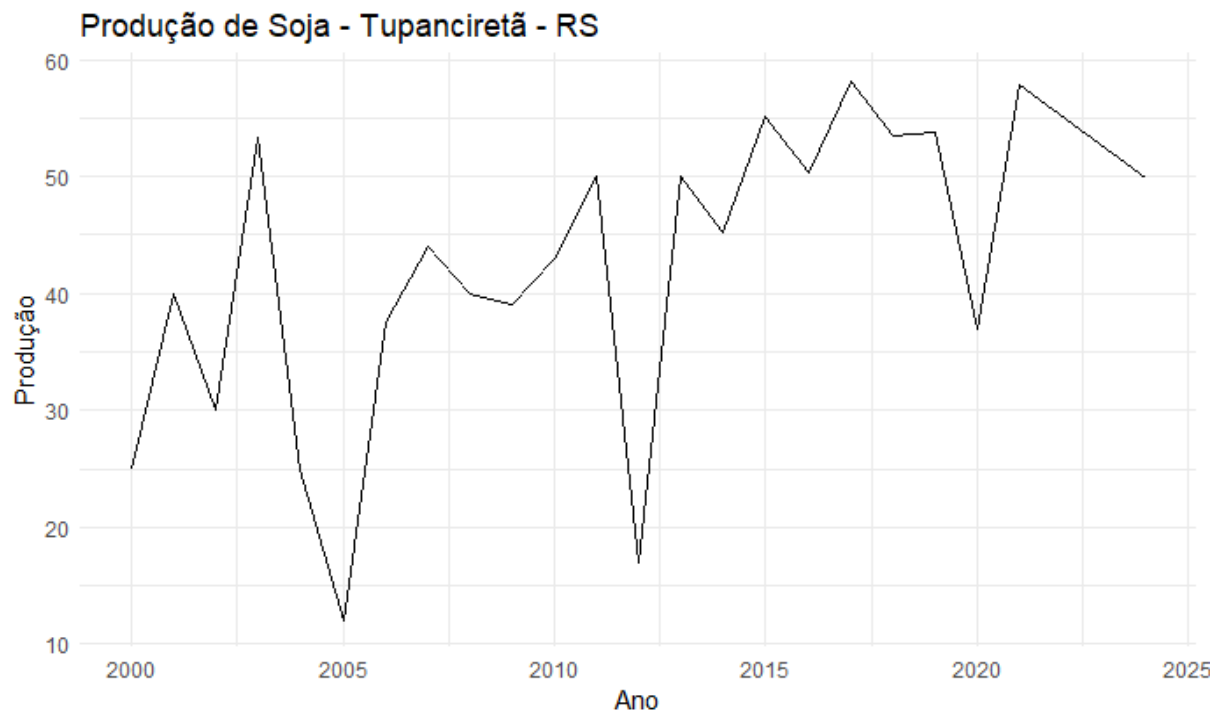


Figura 21 - Série histórica da produção de soja em Tupanciretã-RS

Após a exposição dos gráficos de produção histórica, iniciou-se a primeira análise, que se refere à estimação da produção, sendo que os dados não sofreram acomodação e nenhuma intervenção de tratamento foi utilizado.

Tabela 10
Estimativa de produção e renda do produtor no cultivo de café

Estação meteorológica	Modelo ARIMA	Regressão Linear	Modelo ARIMA		Regressão Linear
	Produção esperada-saca 60kg/ha	Produção esperada-saca 60kg/ha	Preço (US\$/saca 60 kg)	Rendimento esperado (US\$/ha)	Rendimento esperado (US\$/ha)
Barra do Choça-BA	16,53	16,53	\$192,00	3.173,76	3.173,76
Divinolândia-SP	22,95	22,95	\$192,00	4.406,40	4.406,40
Brejetuba-ES	37,81	23,77	\$192,00	7.259,52	4.563,84
Patrocínio-MG	27,23	25,06	\$192,00	5.228,16	4.811,52

Nesta análise, foram utilizadas duas abordagens, pelo modelo ARIMA, através da regressão linear simples, conforme apresentado na expressão (1). Os resultados indicaram que o modelo ARIMA é adequado para a previsão da produção de café, com coeficientes significativos e medidas de erro razoáveis. Além disso, o modelo ARIMA é apropriado para o uso em séries temporais, comparado a regressão linear.

Na cidade de Barra do Choça, foi utilizado o modelo ARIMA (0,0,0). O coeficiente foi de 16,52 com um erro padrão de 1,0530. Ao se calcular o intervalo de confiança, o resultado entre 14,46 e 18,59 sugere que o coeficiente é estatisticamente significativo a um nível de confiança de 95%. Em Brejetuba, o coeficiente AR1 é -0,9268, com um erro padrão de 0,0880, o intervalo de confiança foi de -1,0974 a -0,7562. Esse resultado demonstra que é estatisticamente significativo, a 95% de confiança. Além disso, Brejetuba foi a cidade com maior nível de produção de café na amostra analisada.

Para o ajuste ao modelo ARIMA da estação de Divinolândia, o modelo autoajustado não inclui termos autorregressivos (AR), termos de média móvel (MA) ou diferenciação. Em vez disso, ele consiste apenas em um valor médio não nulo, ajustando um valor médio constante para a série temporal. Ademais, o intervalo de confiança para o coeficiente foi de 14,46 a 18,59, com um nível de confiança de 95%. Como o intervalo de confiança não inclui zero e é todo positivo, isso sugere que o coeficiente é estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95%.

Em Patrocínio, o coeficiente AR1 foi de -0,7701, com um erro padrão de 0,1227, e o intervalo de confiança para o coeficiente AR1 foi de -1,0096 a -0,5306. Como o intervalo de confiança não inclui zero e é todo negativo, isso sugere que o coeficiente AR1 é estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95%.

Tabela 11
Estimativa de produção e renda do produtor no cultivo de milho

Estação meteorológica	Modelo ARIMA	Regressão Linear	Modelo ARIMA		Regressão Linear
	Produção esperada-saca 60kg/ha	Produção esperada-saca 60kg/ha	Preço (US\$/saca 60 kg)	Rendimento esperado (US\$/ha)	Rendimento esperado (US\$/ha)
Lucas do Rio Verde-MT	88,00	81,28	\$17,11	1.505,32	1.390,37
Toledo-PR	82,12	83,16	\$17,11	1.404,67	1.422,60
Rio Verde-GO	73,78	67,80	\$17,11	1.262,03	1.159,85
Maracaju-MS	73,78	67,92	\$17,11	1.262,03	1.161,78

Quanto à produção de milho, a cidade de Lucas do Rio Verde, em Mato Grosso, foi a cidade com maior produção estimada, com 88 sacas de 60kg por hectare. Ademais, foi utilizado o modelo ARIMA (0,1,0), em que não há coeficientes AR ou MA, portanto, não há coeficientes para se calcularem intervalos de confiança tradicionais, como nos modelos ARIMA, com termos autorregressivos ou de média móvel. No entanto, no modelo, o foco principal é a diferenciação de primeira ordem (I), representada pelo termo “0,1,0”, no ARIMA. Essa

diferenciação de primeira ordem foi aplicada para tornar a série temporal estacionária. Ao se analisarem os resíduos, o modelo não apresentou autocorrelações significativas.

Em Toledo, no estado do Paraná, foi utilizado o modelo ARIMA (0,0,1), com termo de média não nula (*non-zero mean*) ajustado, o termo de média foi igual a 82,1162 e um coeficiente de média móvel (MA1) igual a 0,5591. O intervalo de confiança para o coeficiente de média foi de 70,21 a 94,01, com um nível de confiança de 95%. O intervalo de confiança para o coeficiente MA1 não inclui zero, o que sugere que o coeficiente MA1 é estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95% e o intervalo de confiança para o coeficiente de média também não inclui zero, o que sugere que o termo de média não nula foi estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95%.

Para as cidades de Rio Verde e Maracaju, ambas possuem o mesmo valor estimado de produção, entretanto, apenas a cidade de Rio Verde possui coeficiente AR2 estatisticamente significativo. A cidade de Maracaju apresentou intervalo de confiança para o coeficiente AR1 -1,36 a -0,50, o que sugere que o coeficiente AR1 é estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95%. Entretanto, o intervalo de confiança para o coeficiente AR2 -0,85 a 0,005 inclui zero, o que sugere que o coeficiente AR2 não é estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95%.

Tabela 12
Estimativa de produção e renda do produtor no cultivo de soja

Estação meteorológica	Modelo ARIMA	Regressão Linear	Modelo ARIMA		Regressão Linear
	Produção esperada-saca 60kg/ha	Produção esperada-saca 60kg/ha	Preço (US\$/saca 60 kg)	Rendimento esperado (US\$/ha)	Rendimento esperado (US\$/ha)
Sorriso-MT	56,00	41,92	\$28,41	1.590,96	1.190,99
Cascavel – PR	59,36	53,19	\$28,41	1.686,28	1.511,11
Rio Verde – GO	60,00	49,85	\$28,41	1.704,60	1.416,27
Tupanciretã-RS	49,93	41,67	\$28,41	1.418,62	1.183,76

Com base na análise dos resultados, a cidade de Rio Verde, em Goiás, possui a maior produção estimada baseada no modelo ARIMA, diferente da regressão linear, em que a cidade de Cascavel possui a maior produção estimada. Ademais, todas as cidades tiveram coeficiente estatisticamente significativos, a 95% de confiança.

4.3 Precificação do derivativo climático

Após a estimação da produção, foi realizada a precificação do derivativo climático. Primeiro foi feita a precificação, utilizando-se a simulação de Monte Carlo com 20.000 simulações. Ao se realizar a precificação pelo método, notou-se que, para todas as cidades analisadas, foram obtidos valores relevantes apenas para o *Call* (compra), baseado no *Cooling Degree Days* (CDD).

Os resultados demonstram que há uma oportunidade para o produtor se proteger contra o risco de temperaturas desfavoráveis, como geadas ou temperaturas muito baixas, que poderiam afetar negativamente sua produção de café. O *Call* permite que o produtor compre café a um preço específico (*strike*), se as condições climáticas resultarem em uma queda nos preços. Portanto, o *Call* pode ajudar a proteger a receita do produtor em situações adversas.

Tabela 13
Precificação do derivativo climático – simulação de Monte Carlo

Estação meteorológica	CAFÉ			
	Monte Carlo-CDD		Monte Carlo-HDD	
	Call	Put	Call	Put
	Preço	Preço	Preço	Preço
Barra do Choça-BA	\$93,76	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Divinolândia-SP	\$89,78	\$0,00	\$0,00	\$0,11
Brejetuba-ES	\$90,28	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Patrocínio-MG	\$93,46	\$0,00	\$0,00	\$0,00
	MILHO			
Lucas do Rio Verde-MT	\$126,85	\$0,00	\$0,00	\$0,02
Toledo-PR	\$114,24	\$0,00	\$0,00	\$0,33
Rio Verde-GO	\$120,86	\$0,00	\$0,00	\$0,17
Maracaju-MS	\$118,06	\$0,00	\$0,00	\$0,24
	SOJA			
Sorriso-MT	\$117,52	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Cascavel-PR	\$113,43	\$0,00	\$0,00	\$0,12
Rio Verde-GO	\$117,12	\$0,00	\$0,00	\$0,02
Tupanciretã-RS	\$106,29	\$0,00	\$0,00	\$0,30

O segundo método utilizado para precificação foi o *Burn Analysis*, os resultados mostram um valor médio de *Call* para todas estações e culturas. Entretanto na cidade de Brejetuba no estado do Espírito Santo, foi possível notar um preço de *Call* (10,83) referente ao CDD maior que as demais. Isso significa que o produtor tem uma necessidade maior de graus para resfriamento na produção de café.

Por outro lado, referente à cultura de soja e milho, os preços mais altos referem-se ao HDD, ou seja, uma necessidade do produtor no que diz respeito ao aquecimento das temperaturas. Independentemente, para todas as estações, os dois índices obtiveram resultados consistentes, apesar de baixos comparados ao Método de Monte Carlo.

Tabela 14
Precificação do derivativo climático – *Burn Analysis*

Estação meteorológica	CAFÉ					
	Burn-CDD			Burn-HDD		
	Call	Put	Call	Put	Call	Put
	Preço	Média CDD	Preço	Preço	Média HDD	Preço
Barra do Choça-BA	\$4,49	0,091	\$0,09	\$3,02	0,060	\$0,06
Divinolândia-SP	\$1,58	0,005	\$0,01	\$9,23	9,227	\$0,95
Brejetuba-ES	\$10,83	0,776	\$0,77	\$2,69	0,007	\$0,01
Patrocínio-MG	\$4,09	0,137	\$0,14	\$5,49	0,085	\$0,08
			MILHO			
Lucas do Rio Verde-MT	\$1,62	0,004	\$0,00	\$8,33	0,131	\$0,13
Toledo-PR	\$1,58	0,001	\$0,00	\$16,10	2,851	\$2,83
Rio Verde-GO	\$1,07	0,001	\$0,00	\$11,58	1,444	\$1,43
Maracaju-MS	\$1,41	0,001	\$0,00	\$15,12	2,062	\$2,05
			SOJA			
Sorriso-MT	\$1,62	0,005	\$0,00	\$4,47	0,006	\$0,01
Cascavel-PR	\$1,58	0,001	\$0,00	\$13,93	1,033	\$1,03
Rio Verde-GO	\$1,07	0,001	\$0,00	\$8,88	0,154	\$0,15
Tupanciretã-RS	\$0,09	4,503	\$4,48	\$15,24	2,622	\$2,61

Na tabela 15, abaixo, a precificação foi feita com base no Equilíbrio de preços, sendo possível evidenciar que, quanto maior o nível de aversão ao risco do produtor, menor é o valor do derivativo. Esse resultado está de acordo com o que fora apresentado por Cao e Wei (2004) e Richards, Manfredo e Sanders (2004), que mostraram que, quanto o maior nível de aversão ao risco, menor será o preço do contrato, resultado esse que corrobora com a teoria microeconômica de riscos. Além disso, os resultados indicaram que o prêmio de risco associado à variável de temperatura é significativo. Isso significa que o risco climático tem um impacto substancial no preço dos derivativos climáticos.

Tabela 15
Precificação do derivativo climático – Equilíbrio de preços
CAFÉ

Estação meteorológica	Aversão ao Risco	Burn-CDD		Burn-HDD	
		Call	Put	Call	Put
		Preço	Preço	Preço	Preço
Barra do Choça-BA	0	\$0,08	\$0,02	\$0,06	\$0,01
	1	\$-0,11	\$-0,01	\$-0,07	\$0,00
	10	\$-1,80	\$-0,25	\$-1,22	\$-0,35
Divinolândia-SP	0	\$0,00	\$0,00	\$0,85	\$0,23
	1	\$-0,01	\$0,00	\$-1,11	\$-0,06
	1	\$-0,10	\$-0,01	\$-18,76	\$-2,61
Brejetuba-ES	0	\$0,69	\$0,18	\$0,01	\$0,00
	1	\$-0,90	\$-0,05	\$-0,01	\$0,00
	10	\$-15,19	\$-2,11	\$-0,15	\$-0,02
Patrocínio-MG	0	\$0,12	\$0,03	\$0,08	\$0,02
	1	\$-0,16	\$-0,01	\$-0,10	\$0,00
	10	\$-2,68	\$-0,37	\$-1,67	\$-0,23

4.4 Análise de efetividade de *hedge*

Após a exposição das análises referentes à precificação, foi realizada a análise da efetividade de *Hedge*. A seguir, a tabela 16, com os resultados obtidos através do método de *Mean root square loss – MRSL*

Tabela 16
Efetividade do derivativo climático – Mean root square loss-MRSL
CAFÉ

Estação meteorológica	Renda sem contrato (US)	Renda com contrato (US)	Variação	MRSL
Barra do Choça-BA	\$3.173,76	\$3.708,56	16,85%	93,76
Divinolândia-SP	\$4.406,40	\$4.496,18	2,04%	102,82
Brejetuba-ES	\$7.259,52	\$7.349,80	1,24%	59,94
Patrocínio-MG	\$5.228,16	\$5.321,62	1,79%	91,75
Milho				
Lucas do Rio Verde-MT	\$1.505,32	\$1.632,16	8,43%	122,24
Toledo-PR	\$1.404,67	\$1.518,91	8,13%	119,13
Rio Verde-GO	\$1.262,03	\$1.382,88	9,58%	115,63
Maracaju-MS	\$1,262,03	\$1.380,09	9,35%	112,44
Soja				
Sorriso-MT	\$1.590,96	\$1.708,48	7,39%	113,82
Cascavel-PR	\$1.686,28	\$1.799,70	6,73%	102,99
Rio Verde-GO	\$1.704,60	\$1.821,72	6,87%	98,92
Tupanciretã-RS	\$1.418,62	\$1.524,91	7,49%	93,42

O valor de MRSL — *mean root square loss* — representa a raiz quadrada da média dos erros quadrados entre a renda real do produtor estimada anteriormente e a renda simulada de um produtor que utiliza derivativos climático precificado pelo método de simulação de Monte Carlo. Ou seja, o valor encontrado de MRSL mede a eficácia do uso de derivativos climáticos para proteger a renda do produtor rural em relação às variações climáticas.

Para todas as análises realizadas na tabela 16, o contrato demonstrou-se eficaz, visto que a renda com contrato foi maior que a sem contrato, representando uma menor exposição ao risco. Os resultados confirmam o estudo de Raucci, Capitani & Silveira, (2019), entretanto, demonstram uma redução média de 9%, comparado aos 30% evidenciados pelos autores.

O segundo método utilizado é o valor em risco (*Value at risk*), que determina a probabilidade da perda por parte da receita a partir de um determinado nível de confiança. Neste estudo, foi utilizado o de 95% de confiança. Os resultados são apresentados na tabela 17.

Tabela 17
Efetividade do derivativo climático – Value at risk-VaR

CAFÉ			
VaR			
Estação meteorológica	Renda sem contrato (US)	Renda com contrato (US)	Variação
Barra do Choça-BA	\$335,50	\$391,56	16,71%
Divinolândia-SP	\$451,12	\$513,90	13,92%
Brejetuba-ES	\$616,14	\$647,52	5,09%
Patrocínio-MG	\$545,63	\$600,01	9,97%
Milho			
Lucas do Rio Verde-MT	\$467,09	\$554,30	18,67%
Toledo-PR	\$463,14	\$541,10	16,83%
Rio Verde-GO	\$411,85	\$479,07	16,32%
Maracaju-MS	\$411,85	\$478,03	16,07%
Soja			
Sorriso-MT	\$575,22	\$687,23	19,47%
Cascavel-PR	\$509,32	\$586,43	15,14%
Rio Verde-GO	\$506,60	\$599,44	18,33%
Tupanciretã-RS	\$268,56	\$322,84	20,21%

Os resultados mostram que há, em todas as análises, uma variação positiva entre a renda sem contrato e a renda com contrato, o que ajuda a se comprovar a efetividade da utilização do derivativo climático nas cidades da amostra. A mensuração pelo VaR tem como premissa que, se a alteração em risco resultante da compra do derivativo for positiva, o derivativo reduz o risco, resultado que corrobora o estudo de Alves Neto (2021).

Os resultados seguem uma tendência semelhante. Pode-se inferir que, de modo geral, os contratos de derivativos climáticos possuem um impacto positivo na proteção contra perdas de renda devido às condições climáticas adversas à cultura, com variações de 5,09% a 20,21%, o que demonstra um benefício para os produtores, pois ajuda na mitigação de riscos e garantem uma receita mais estável.

O terceiro e último método utilizado para se verificar a efetividade de *hedge* do contrato simulado é a equivalente certeza de receitas (*certainty equivalent revenues-CERs*), uma abordagem para se avaliar como a utilização de derivativos climáticos afeta a certeza das receitas. Foi desenvolvido comparando-se a renda com contratos de derivativos climáticos com a renda sem esses contratos, considerando-se a probabilidade de eventos climáticos adversos.

Sendo assim, com relação à equivalente de certeza de receitas, foi considerada a segurança ou certeza das receitas, em vez do seu valor médio esperado. A ideia é que os contratos de derivativos climáticos podem fornecer uma renda mais previsível, mesmo que o seu valor médio esperado seja menor do que a renda sem proteção. Abaixo, a tabela 18 com os resultados.

Tabela 18
Efetividade do derivativo climático – *certainty equivalent revenues* — CERs

CAFÉ	
CERs	
Estação meteorológica	CERs a 95%
Barra do Choça-BA	142,61
Divinolândia-SP	138,96
Brejetuba-ES	90,28
Patrocínio-MG	128,43
Milho	
Lucas do Rio Verde-MT	162,36
Toledo-PR	160,93
Rio Verde-GO	156,28
Maracaju-MS	150,23
Soja	
Sorriso-MT	129,50
Cascavel-PR	124,98
Rio Verde-GO	117,12
Tupanciretã-RS	120,77

Como é possível observar, os valores de CERs são relativamente baixos, sugerindo um nível baixo de incertezas. Além disso, os resultados tiveram números positivos, os quais podem

indicar que o produtor que utiliza derivativo climático tem uma proteção maior do que aquele que não o utiliza. Tais resultados corroboram os estudos de Vedenov & Barnett (2004), que não obtiveram diferenças significativas entre os métodos de análise de efetividade de *hedge*.

4.5 Hipóteses

Finalizando-se a análise e exposição dos resultados, iniciou-se a validação das hipóteses levantadas anteriormente.

H₁: a utilização do derivativo climático com objetivo de *hedge* é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Barra do Choça-BA.

H₂: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Divinolândia-SP.

H₃: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Brejetuba-ES.

H₄: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de café na cidade de Patrocínio-MG.

Quanto às hipóteses 1, 2, 3 e 4, o método de *Mean root square loss* — MRS_L — demonstrou números promissores, representando uma variação de 16,85% em Barra do Choça, 2,04% em Divinolândia, 1,24% em Brejetuba e 1,79% em Patrocínio. Essa variação representa uma expectativa de proteção à renda do produtor. Além disso, os resultados do teste de equivalente de certeza de receita — CERs — mostraram-se bastante promissores, visto que o resultado positivo indica que a estratégia que envolve o uso de contratos de derivativos climáticos é vantajosa em relação a uma alternativa que não utiliza esses derivativos em termos de receitas esperadas. Isso significa que o produtor que utiliza derivativos climáticos tem uma expectativa de renda superior à do produtor que não o utiliza, confirmando as quatro hipóteses de que o uso de derivativo climático é efetivo na mitigação de riscos para a cultura do milho nessas cidades.

H₅: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Lucas do Rio Verde-MT.

H₆: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Toledo-PR.

H₇: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Rio Verde-GO.

H₈: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de milho na cidade de Maracaju-MS.

Quanto às hipóteses 4, 5, 6 e 7, relacionadas à cultura do milho, utilizando-se o método de *Mean root square loss* — MRSL, as variações seguiram a mesma distribuição, representando uma variação de 8,43% em Lucas do Rio Verde, 8,13% em Toledo, 9,58% em Rio Verde e 9,35% em Maracaju. Essa variação representa uma expectativa de proteção à renda do produtor. Quando comparadas ao método de Value at Risk – VaR, as variações foram ainda mais relevantes, em especial na cidade de Lucas do Rio Verde, representando um aumento de 18,67% na renda do produtor. Além disso, os resultados do teste de equivalente de certeza de receita – CERs, a 95% de confiança foram 162,36 na cidade de Lucas do Rio Verde, 160,93 em Toledo, 156,28 em Rio Verde e 150,23 em Maracaju, confirmando-se as quatro hipóteses de que o uso de derivativo climático é efetivo na mitigação de riscos para a cultura do milho nessas cidades.

H₉: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Sorriso-MT.

H₁₀: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Cascavel-PR.

H₁₁: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Rio Verde-GO.

H₁₂: a operação de *hedge* em derivativos climáticos é efetiva para a mitigação de riscos para a cultura de soja na cidade de Tupanciretã-RS.

Quanto às hipóteses 9, 10, 11 e 12, no que tange à cultura da soja, utilizando-se o método de *Mean root square loss* — MRSL, também seguiram uma distribuição mais homogênea, representando uma variação de 7,39% na cidade de Sorriso, 6,73% em Cascavel, 6,87% em Rio Verde e 7,49% em Tupanciretã. Quando comparado ao método de Value at Risk – VaR, as variações foram ainda mais expressivas, em especial na cidade de Tupanciretã, que representou um aumento na renda do produtor em 20,21%. Além disso, os resultados do teste de equivalente de certeza de receita – CERs, a 95% de confiança foram 129,50 na cidade de Sorriso, 124,98 em Cascavel, 117,12 em Rio Verde e 120,77 em Maracaju. Esses resultados confirmam as quatro hipóteses de que o uso de derivativo climático é efetivo na mitigação de riscos para a cultura da soja nessas cidades.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os derivativos climáticos emergem como uma ferramenta de vanguarda para gerenciar riscos climáticos não catastróficos. Ainda que tenham origem nos Estados Unidos, inicialmente concebidos para a indústria de energia, seu escopo se expandiu para a agricultura, dadas as intrínsecas relações entre produção e clima nesse setor.

Neste estudo, traçou-se uma exploração minuciosa da efetividade do uso de derivativos climáticos como uma ferramenta essencial para a gestão de riscos nas atividades agrícolas. Abrangendo as culturas de café, milho e soja em diversas cidades do Brasil, esta pesquisa não somente atingiu seus objetivos iniciais, como também trouxe à tona resultados que desempenham um papel crucial na mitigação dos riscos enfrentados pelos agricultores, o que pode impulsionar uma revolução na forma como o setor agrícola aborda as mudanças climáticas.

O trabalho teve início com a compreensão do cenário complexo e desafiador que se configura para os agricultores na era das mudanças climáticas. As oscilações climáticas são cada vez mais frequentes e impactantes, levando a perdas substanciais nas safras, o que ameaça a segurança alimentar global e a estabilidade econômica das comunidades agrícolas.

A revisão da literatura proporcionou uma compreensão profunda dos fundamentos teóricos subjacentes aos derivativos climáticos. Estabelecemos uma base sólida, abordando os principais conceitos relacionados a esses instrumentos financeiros. Esse conhecimento prévio foi fundamental para compreender as estratégias de *hedge* e avaliar sua efetividade no setor agrícola.

A limitação de informações em determinados dias da amostra não prejudicou os resultados, visto que eles convergiram com as descobertas encontradas na literatura internacional. O emprego de métodos, Simulação de Monte Carlo, *Burn Analysis* e Equilíbrio de Preços teve impacto significativo na avaliação da pertinência dos derivativos no Brasil.

Os agricultores fictícios que utilizaram derivativos climáticos como ferramentas de *hedge* se beneficiaram significativamente da proteção que esses instrumentos oferecem. Os resultados são expressos em métricas que demonstram, de maneira inequívoca, a efetividade desses derivativos, desde o *Mean Root Square Loss* (MRSL) até o *Value at Risk* (VaR) e as equivalências de certeza de receita (CERs).

Vale a pena destacar os resultados no que diz respeito às culturas específicas e às cidades analisadas. Em Barra do Choça-BA, Divinolândia-SP, Brejetuba-ES e Patrocínio-MG, que compreendem a cultura do café, os derivativos climáticos demonstraram uma variação no MRSL, que se traduz em uma proteção efetiva das receitas dos agricultores. Da mesma forma,

o VaR e o CERs em todas essas localidades confirmaram a capacidade desses instrumentos em proporcionar previsibilidade e estabilidade de receita.

Quando mudamos o foco para o milho e analisamos as cidades de Lucas do Rio Verde-MT, Toledo-PR, Rio Verde-GO e Maracaju-MS, o quadro é substancial. A variação significativa no MRSL, juntamente com o aumento na renda dos agricultores, evidencia a capacidade dos derivativos climáticos em mitigar os riscos associados às flutuações climáticas nessa cultura.

Na cultura da soja, representada pelas cidades de Sorriso-MT, Cascavel-PR, Rio Verde-GO e Tupanciretã-RS, os resultados seguem a mesma tendência, com o MRSL, VaR e CERs destacando a efetividade desses instrumentos para proporcionar proteção e estabilidade às receitas dos agricultores.

Sendo assim, o cumprimento do objetivo geral foi concluído. A pesquisa apresentou resultados consistentes que demonstram que o uso de derivativos climáticos é eficaz na mitigação dos riscos climáticos nas culturas analisadas em diversas cidades do Brasil. Os agricultores que adotaram estratégias de *hedge* com derivativos climáticos experimentaram uma maior previsibilidade e estabilidade nas suas receitas, fornecendo uma solução viável para os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

As hipóteses levantadas no início deste estudo foram integralmente confirmadas. Em todas as culturas e cidades analisadas, ficou demonstrado que o uso de derivativos climáticos é efetivo na mitigação de riscos. Os agricultores que adotam essa estratégia contam com uma proteção substancial contra as variações climáticas adversas, além de uma expectativa de renda superior em comparação com os que não utilizam esses instrumentos.

O desdobramento prático dessas descobertas promete melhorias significativas na gestão de riscos para os agricultores. Isso permite planejar suas operações com maior segurança e confiança, além de fortalecer a resiliência do setor agrícola como um todo. Como instrumentos financeiros que demonstraram ser eficazes na mitigação de riscos climáticos, os derivativos climáticos têm o potencial de revolucionar a maneira como a agricultura lida com as mudanças climáticas.

Além de seu impacto direto na agricultura, os resultados desta pesquisa também podem informar a tomada de decisões por parte de agentes do mercado de capitais e reguladores interessados em promover soluções financeiras inovadoras para o setor agrícola. Essas descobertas não apenas reforçam a importância desses instrumentos, bem como lançam luz sobre uma estratégia eficaz para melhorar a resiliência do setor agrícola.

No seu conjunto, esta pesquisa não apenas respondeu ao problema de pesquisa, mas também forneceu informações críticas, evidências sólidas e diretrizes para o uso eficaz de derivativos climáticos no agronegócio brasileiro. Concluimos que esses instrumentos financeiros podem ser uma ferramenta para enfrentar os desafios climáticos e contribuir para um setor agrícola mais resiliente e sustentável.

É importante ressaltar que o presente estudo não buscou estabelecer juízo sobre a superioridade ou inferioridade de alternativas de mitigação de riscos no setor agrícola. Seu propósito reside em enriquecer o leque de instrumentos disponíveis para gestão de riscos. Os derivativos climáticos ostentam robustez e uma abordagem menos burocrática quando comparados aos seguros agrícolas.

Como pesquisadores, encerramos este estudo com uma sensação profunda de satisfação e a convicção de que este trabalho contribuiu significativamente para o campo da gestão de riscos no setor agrícola. No entanto, reconhecemos que a pesquisa é um processo contínuo, e há oportunidades para estudos futuros explorarem ainda mais essa área.

Este campo de pesquisa revela-se profícuo, com inúmeras questões ainda carentes de resposta. Futuras investigações poderiam se direcionar à formulação de modelos teóricos específicos para os distintos biomas e climas do Brasil, ampliando ainda mais nosso entendimento e capacidade de gerenciar riscos nesse setor vital.

Esperamos que esta pesquisa inspire novas investigações e continue a iluminar o caminho para uma agricultura mais resiliente, estável e produtiva em face das mudanças climáticas. Este estudo, portanto, reforça a extraordinária promessa dos derivativos climáticos como uma ferramenta de gestão de riscos no setor agrícola, oferecendo soluções práticas para desafios críticos enfrentados pelos agricultores em todo o mundo.

REFERÊNCIAS

- Alaton, P., Djehiche, B., & Stillberger, D. (2002). On modelling and pricing weather derivatives. *Applied Mathematical Finance*, 9(1), 1–20. <https://doi:10.1080/13504860210132897>.
- Al-Ghussain, L. (2019) Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*.
- Alves Neto, A. (2021). Estudo sobre a viabilidade do uso de derivativos climáticos como ferramenta de gestão de risco na cultura da soja no estado do Mato Grosso. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. doi:10.11606/D.11.2021.tde-31032021-151900. Recuperado em 2023-04-03, de www.teses.usp.br
- Amorim Neto, C. S. (2015). Efetividade do *hedge* para o boi gordo com contratos da BM&FBOVESPA: análise para os estados de São Paulo e Goiás. Master's Dissertation, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba. doi:10.11606/D.11.2015.tde-12032015-152555. Retrieved 2023-05-20, from www.teses.usp.br.
- Arbuckle, J. G., Morton, L. W. & Hobbs, J. (2015) Understanding farmer perspectives on climate change adaptation and mitigation: the roles of trust in sources of climate information, climate change beliefs, and perceived risk. *Environment and Behavior*.
- Assaf Neto, A., & Lima, F. G. (2014). Curso de administração financeira. São Paulo: atlas.
- Babcock, B. A., Choi, E. K., & Feinerman, E. (1993). Risk and probability premiums for CARA utility functions. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 17-24.
- Ball, C, Torous W (1985). On Jumps in Common Stock Prices and *Call* Option Pricing. *Journal of Finance*, 40, 155-173.
- Berh, E., Schimitz, B., Starp, M. & Trenkel, H. (2006). Weather derivatives as a risk management tool in agriculture. *Income Stabilization in Agriculture. The Role of Public Policies*. Edizione Scientifiche Italiane.
- Bertrand, J.-L., & Brusset, X. (2018). Managing the financial consequences of weather variability. *Journal of Asset Management*, 19(5), 301–315. <https://doi.org/10.1057/s41260-018-0083-x>.
- Black, F. (1976) “The Pricing of Commodity Contracts.” *Journal of Financial Economics*.
- Black, F. & Scholes, M. (1973) “The Pricing of Options and Corporate Liabilities.” *Journal of Political Economy*.
- Boyle, P. (1977) “Options: a Monte Carlo Approach.” *Journal of Financial Economics*.

- Brasil, Bolsa, Balcão (2021). *B3 e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) firmam protocolo de intenções*. https://www.b3.com.br/pt_br/noticias/b3-e-instituto-nacional-de-meteorologia-firmam-protocolo-de-intencoes.htm#
- Botos, H.M. & Ciumas, C. (2012). The use of the Black-Scholes model in the field of weather derivatives. *Procedia Economics and Finance*, v.3, p.611-616. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(12\)00203-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(12)00203-1).
- Cao, M., Li, A. & Wei, J. (2003), *Weather Derivatives: a new Class of Financial Instruments*, York University, XL Weather & Energy Inc., Stamford and University of Toronto, April.
- Cao, M., & Wei, J. (2004). Weather derivatives valuation and market price of weather risk. *Journal of Futures Markets*, 24(11), 1065–1089. doi:10.1002/fut.20122.
- Caporin, M. & Press, J. (2006). A Memory Time Varying ARFIMA Model for Weather derivative pricing.
- Caron, B. O., Oliveira, D. M., Elli, E. F., Eloy, E., Schwerz, F., & Souza, V. Q. (2017). Elementos meteorológicos sobre características morfológicas e produtivas do milho em diferentes épocas de semeadura. *Científica*, 45(2), 105–114. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2017v45n2p105-114>.
- Chung, W. (2011). *Evaluating weather derivatives and crop insurance for farm production risk management in Southern Minnesota*. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy. <https://hdl.handle.net/11299/119325>.
- Conab. (2023). *Acompanhamento da Safra Brasileira. Boletim Café Janeiro de 2023*. https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/46198_948b1c7df3f80ff9b87160bf67f15c28
- Considine G. (2000): *Introduction to Weather Derivatives*. Weather Derivatives Group, Aquila Energy.
- Cox, J. & Ross, S. A. (1976) “The Valuation of Options for Alternative Stochastic Processes.” *Journal of Finance and Economics*.
- De Montreuil Carmona, C., Aquino, J., Paredes, B., & Torres, M. (2014). Teoria do Hedge: Recortes Teórico-Empíricos Aplicados À Gestão do risco com derivativos. *Revista de Informação Contábil*, 8(2), 29-48. doi:<https://doi.org/10.34629/ric.v8i2.29-48>
- Diethelm, K., Ford, N.J., Freed A.D. & Luchko, Yu. (2005). Algorithms for the fractional calculus: a selection of numerical methods, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.06.006>.
- Dischel, B. (1998) “Black-Scholes Won’t Do.” Weather Risk Special Report, Energy and Power Risk Management.

- Embrapa. (2021). *O Agro no Brasil e no Mundo: Uma síntese do Período de 2000 a 2020*.
<https://www.embrapa.br/documents/10180/62618376/O+AGRO+NO+BRASIL+E+NO+MUNDO.pdf/41e20155-5cd9-f4ad-7119-945e147396cb>
- Gonçalves, J. S.; Souza, A. S. A. M. (2009). Financiamento do custeio agropecuário atrelado a contrato de opção: pioneirismo paulista.
- Henderson, R. (2002). *Pricing Weather Risk*. Weather Risk Management, markets, products and applications.
- Hess, M. (2016). Modeling and Pricing Precipitation Derivatives Under Weather Forecasts. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 19(07), 1650051.
<https://doi.org/10.1142/S0219024916500515>.
- Hess, M. (2018). Pricing Temperature Derivatives Under Weather Forecasts. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*. <https://doi.org/10.1142/S0219024918500310>.
- Hornaert, A. (2018). Hedging weather risk using weather derivatives: overview & case study AB Inbev.
- Hull, J. C. (2021). *Options, Futures, and Other Derivatives*. 11. Ed. Toronto: Pearson
- Ivanovic, S. & Pajić, M. & Markovic, T. (2014). Economic effectiveness of mechanized harvesting of chamomile. *Ekonomika poljoprivrede*.
- Jewson, S., Brix, A. (2005). Weather derivative valuation: The meteorological, statistical, financial, and mathematical foundations.
- Kermiche, L. & Vuillermet, N. (2016). Weather derivatives structuring and pricing: a sustainable agricultural approach in Africa. *Applied Economics*, 48(2), 165–177.
<https://doi.org/10.1080/00036846.2015.1076147>
- Khan, S., Rennie, M., & Charlebois, S. (2013). Weather risk management by Saskatchewan agriculture producers. *Agricultural Finance Review*, 73(1), 161–178.
<https://doi.org/10.1108/00021461311321375>
- Kreter, A. C., Ferreira, D., Servo, F., Soria, G., Filho, B., Ronaldo, J., & Souza, C. (2023). *CARTA DE CONJUNTURA*. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>
- Labuszewski, J. W., Nyhoff, J., CO, R., Peterson, P. E. (2010). *The CME Group risk management handbook: products and applications*. Hoboken: J. Wiley & Sons.
- Leblois, A., & Quirion, P. (2013). Agricultural insurances based on meteorological indices: realizations, methods and research challenges. *Meteorological Applications*, 20(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1002/met.303>

- Lee, J., Craine, R. (2012). Temperature modeling and weather derivative pricing. *American Journal of Scientific Research*.
- Lemos, G. B. de. (2014). *Precificação de derivativos climáticos no Brasil: uma abordagem estatística alternativa e construção de um algoritmo em R* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2014.tde-07042014-172230>.
- Leuthold, R. M., Junkus, J. C. & Cordier, J. E. (1989). The theory and practice of futures markets.
- Merton, R.C. (1976) “Option Pricing When Underlying Stock Returns Are Discontinuous.” *Journal of Financial Economics*.
- Miceli, W.M. (2017). *Derivativos de agronegócios: gestão de riscos de mercado*. 2. Ed. São Paulo: Saint Paul Editora.
- Morduch, J. (2001). *Rainfall insurance and vulnerability: economic principles and cautionary notes*. New York University.
- Motta, I. de S., Braccini, A. de L. e, Scapim, C. A., Inoue, M. H., Avila, M. R., & Lana Braccini, M. do C. (2008). Época de semeadura em cinco cultivares de soja. II. Efeito na qualidade fisiológica das sementes. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 24, 1281-1286. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2291>
- Musshoff, O., Odening, M. & Xu, W. (2011) Management of climate risks in agriculture– will weather derivatives permeate? *Applied Economics*.
- Nelson, R. R. (1961). Uncertainty, prediction and competitive equilibrium. *Quarterly Journal of Economics*, Cambridge.
- Ozaki, V. A. (2006). *O seguro rural estadual e as novas iniciativas privadas*. Agricultura em São Paulo.
- Ozaki, V. A. (2012). *Análise e gestão de risco agrícola*. Piracicaba: Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas.
- Paddock, J.L., Siegel, D.R. and Smith, J.L. (1988) Option Valuation of Claims on Real Assets: The Case of Offshore Petroleum Leases. *The Quarterly Journal of Economics*, 103, 479-508. <https://doi.org/10.2307/1885541>
- Paxson, D. & Wood, D. (2001). *Dicionário enciclopédico de finanças*. São Paulo, Atlas.
- Pelka, N., Musshoff, O. (2013) Hedging effectiveness of weather derivatives in arable farming – is there a need for mixed indices? *Agricultural Finance Review*.
- Pereira, A. R., Angelocci, L. R., & Sentelhas, P. C. (2002). *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: agropecuária.
- Pereira J, A., & Malaquias, R. F. (2020). Derivativos de Clima: Oportunidades para Pesquisa e a Gestão de Risco no Cenário Brasileiro. *Pensar Contábil*, 22(77), 14–21.

<http://www.spell.org.br/documentos/ver/58058/derivativos-de-clima-oportunidades-para-pesquisa-e-a-gestao-de-risco-no-cenario-brasileiro>

- Pérez-Soto, F., Godínez-Montoya, L., & Figueroa-Hernández, E. (2015). *La producción y el consumo del café*.
- Popinigis, F. *Fisiologia da semente*. 2. Ed. Brasília.
- Purnanandam, A., & Weagley, D. (2016). Can Markets Discipline Government Agencies? Evidence from the Weather Derivatives Market. *The Journal of Finance*, 71(1), 303–334. <https://doi.org/10.1111/jofi.12366>.
- Rasulov, A., & Raimova, G. (2021). *Monte Carlo methods for pricing weather derivatives*. 020017. <https://doi.org/10.1063/5.0057009>
- Raucci, G.L.; Lanna, R.; Silveira, F.D.; Capitani, D.H.D. (2019). Development of weather derivatives: evidence from the Brazilian soybean market. *Italian Review of Agricultural Economics*.
- Raucci, G.L; Capitani, D.H.D., & Silveira, F.D. (2020). Derivativos climáticos na agricultura: uma revisão de literatura. *Revista De Política Agrícola*, 29(3), 83. <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1546>
- Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., & Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PLOS ONE*, 14(5), e0217148. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>
- Ribeiro A. G. (1993). A climatologia geográfica e a organização do espaço agrário. *Boletim de Geografia Teorética*.
- Richards, T. J., Manfredo, M. R., & Sanders, D. R. (2004). Pricing Weather Derivatives. *American Journal of Agricultural Economics*, 86(4), 1005–1017. <http://www.jstor.org/stable/4492788>.
- Richards, T. J., Eaves, J., Fournier, V., Naranjo, S. E., Chu, C. C. & Henneberry, T. J. (2006) “Managing Economic Risk Caused by Insects: Bug Options.” *Agricultural Finance Review*.
- Rodrigues, B.D. (2006). *Modelagem de séries temporais focada na precificação de derivativos climáticos*. 73p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Roncoli, C. (2006) *Ethnography and participatory approaches to research on farmer’s responses to climate prediction*. *Climate Research*.
- Roncoli, C., Crane, T. A. & Oorlove, B. (2009) *Fielding Climate Change in Cultural Anthropology*. In: CRATE, Susan A.; NUTALL, Mark (ed.). *Anthropology and climate change: from encounters to actions*.

- Roustant, O.; Laurent, J. P; Bay, X. & Carraro, L. (2003). Model Risk in the Pricing of Weather Derivatives.
- Schiller, F., Seidler, G. & Wimmer, M. (2012). Temperature Models for Pricing Weather Derivatives. *Quantitative Finance*.
- Schouchana, F., Sheng, H. H. & Decotelli, C. A. (2013). *Gestão de riscos no agronegócio*. Editora FGV.
- Seth, R.; Ansari, V.A.; Datta, M. (2009). Weather-risk hedging by farmers: an empirical study of willingness-to-pay in Rajasthan, India. *Journal of Risk Finance*, v.10, p.54-66, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1108/15265940910924490>
- Silva, E. S., Carvalho, M. A. C., Dallacort, R. (2020). Cultivares de Soja em função de Elementos Climáticos nos Municípios de Tangará da Serra e Diamantino, MT. *Nativa*, 8(2), 157-164. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8382>
- Smith, C. W & Stulz, R. M. (1985). The determinants of firms' hedging policies. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*.
- Stoppa, A., Hess, U. (2003). Design and use of weather derivatives in agricultural policies: the case of rainfall index insurance in Morocco. Italy.
- Sun, B., & Van Kooten, G. C. (2015). Financial weather derivatives for corn production in Northern China: a comparison of pricing methods. *Journal of Empirical Finance*, 32, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.jempfin.2015.03.014>
- Tesfahun, J., Kendeya, T., Shibabaw, A., Gurju, A. & Zergaw, G. (2019). Pricing Weather Derivatives Index based on Temperature: The Case of Bahir Dar.
- Türkvatan, A., Hayfavi, A., & Omay, T. (2020). A regime switching model for temperature modeling and applications to weather derivatives pricing. *Mathematics and Financial Economics*, 14(1), 1–42. <https://doi.org/10.1007/s11579-019-00242-0>
- Turvey, C.G. (2001). Weather derivatives for specific event risks in agriculture. *Review of Agricultural Economics*, v.23, p.333-351. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-9353.00065>.
- Tyagi, S., & Shastri, M. (2016). Corporate Governance & Business Ethics: Challenges & Responsibilities. *International Journal of Research in Finance and Marketing*, 6, 137-153.
- Vedenov, D. & Barnett, B. (2004). Efficiency of Weather Derivatives as Primary Crop Insurance Instruments. *Journal of Agricultural and Resource Economics*.
- Weagley, D.R. *Essays on the weather derivatives market*. (2014). 126p. Dissertation (Doctor) – University of Michigan.

- Weeks, D. V. & Bellinghini, D. F. (2011). *Hedge* simultâneo de preço e taxa de câmbio: uma análise para o mercado de soja em Paranaguá. In: 1ª Conferência em Gestão de Risco e Comercialização de Commodities, 2011, São Paulo. Anais da 1ª CGRCC.
- Woodard, J.D. and Garcia, P. (2008). Basis risk and weather hedging effectiveness. *Agricultural Finance Review*. <https://doi.org/10.1108/00214660880001221>.
- Yuan, W., Göncü, A., & Ökten, G. (2015). Estimating sensitivities of temperature-based weather derivatives. *Applied Economics*, 47(19), 1942–1955.
<https://doi.org/10.1080/00036846.2014.1002888>.