

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
SOCIOECONÔMICO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO

FERNANDO ALVES SILVEIRA

BLOCKCHAIN E DERIVATIVOS CLIMÁTICOS: APLICAÇÕES PARA
O AGRONEGÓCIO BRASILEIRO

CRICIÚMA

2021

FERNANDO ALVES SILVEIRA

***BLOCKCHAIN E DERIVATIVOS CLIMÁTICOS: APLICAÇÕES PARA
O AGRONEGÓCIO BRASILEIRO***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Socioeconômico da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Socioeconômico.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Parodi Oliveira Camilo. Coorientadora: Profa. Dra Melissa Watanabe

CRICIÚMA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S587b Silveira, Fernando Alves.

Blockchain e derivativos climáticos:
aplicações para o agronegócio brasileiro /
Fernando Alves Silveira. - 2021.

83 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do
Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-
Graduação em Desenvolvimento Socioeconômico,
Criciúma, 2021.

Orientação: Silvio Parodi Oliveira Camilo.
Coorientação: Melissa Watanabe.

1. Blockchains (Base de dados). 2.
Instituições financeiras - Inovações
tecnológicas. 3. Contratos inteligentes. 4.
Climatologia agrícola. 5. Agroindústria. I.
Titulo.

CDD 23. ed. 332.178

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Noéli pelo amor e suporte dedicado a mim por todos estes anos. Faltam palavras para agradecer. Sem ela esta pesquisa não seria possível. Agradeço a minha mãe Teresinha e minhas irmãs Sabrina e Samara pelo apoio incondicional em todos os momentos. Não poderia deixar de mencionar meus cunhados e sobrinhos que fizeram esta caminhada um pouco mais fácil. Agradeço ainda a todos os meus amigos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Sílvio Parodi Oliveira Camilo pela dedicação e confiança depositada neste trabalho, e pela influência na minha formação enquanto pesquisador. Agradeço ainda a minha coorientadora Prof(a). Dra. Melissa Watanabe pela experiência em sala de aula, incentivo e dedicação acadêmica. Agradeço a MSc. Roger Alan Marçal da Silva pelo apoio e suporte dedicado. Externalizo a minha gratidão para as valiosas contribuições dos professores Dr. Miguelangelo Gianezini, Dr Rodrigo Lanna Franco da Silveira e Dr Flávio Luiz de Moraes Barboza. Agradeço ainda as valiosas contribuições dos colegas Érico e Igor.

Estendo os agradecimentos a todos os professores e funcionários do PPGDS pelo seu comprometimento com o curso para além das salas de aula. Aos colegas de mestrado que fizeram parte dessa jornada.

Agradeço ao Banco do Brasil S.A e seus funcionários pelo suporte e apoio, e a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente e que deixei de mencionar, estendo os meus agradecimentos.

“Em algum lugar, algo incrível
está esperando para ser descoberto”

Carl Sagan

RESUMO

Mudanças profundas no desenho e funcionamento das instituições financeiras estão se consolidando. Neste contexto, a tecnologia de registro distribuído (DLT), conhecida como *Blockchain*, acelerou as transformações no setor, provê uma plataforma para inovação e desenvolvimento de novas soluções, e o redesenho de produtos e serviços financeiros tradicionais. De mesma importância o risco climático apresenta desafios para diversos setores, entre os mais afetados encontram-se os agricultores. Neste sentido, os derivativos climáticos emergem na literatura como alternativa viável para o gerenciamento desta fonte de risco. Nesta direção, a presente pesquisa objetivou desenvolver uma prova de conceito para verificar a viabilidade na criação e transação de derivativos climáticos. Para atender o objetivo central de estudo foi necessário construir e analisar uma plataforma baseada em tecnologia *Blockchain* para negociação destes ativos. Posteriormente, foram estimadas e precificadas opções de *call* para o *hedge* de temperatura baseado no modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), para três localidades brasileiras com relevância na produção de *commodities* agrícolas: Jataí (GO), Irati (PR), Rio Verde (GO). Por fim, foi analisada e verificada a viabilidade técnica, econômica e legal das soluções desenvolvidas. A pesquisa constitui-se de uma abordagem aplicada. Os métodos quantitativos da estimação econométrica dos contratos foram utilizados em paralelo a estratégia de *Design Science Research* (DSR), no qual amparou metodologicamente o desenvolvimento de provas de conceito e protótipos como objeto de pesquisa. A plataforma desenvolvida compreende duas partes distintas. O *frontend* constitui-se de um website que interage com os compradores e vendedores, assemelha-se a experiência de uma *startup*. Do outro lado, no *backend* o *Blockchain* realizou todas as transações da plataforma de forma satisfatória. Os custos estimados de lançamento da plataforma foi estimado em aproximadamente R\$ 1 mil reais e os custos de manutenção em menos de um décimo deste valor. Paralelamente, os resultados encontrados na precificação dos contratos de *call* estimam-se de R\$ 80 a R\$ 160 reais, cobrindo um valor limite de até R\$ 6500 por contrato. Estes achados evidenciam o potencial que a tecnologia *Blockchain* pode oferecer a uma gama variada de soluções, bem como a viabilidade na negociação de derivativos climáticos para o agronegócio brasileiro.

Palavras-chave: Blockchain. Contratos inteligentes. DLT. Derivativos climáticos. Risco Climático.

ABSTRACT

Deeply changes in the design and operation of financial institutions are consolidating. In this context, distributed registration technology (DLT), also known as Blockchain, accelerated the transformations in the sector providing a platform for innovation and development of new solutions, and the redesign of products and traditional financial services. Equally important, climate risk presents challenges for several sectors, among the most affected are farmers. In this sense, climatic derivatives emerge in the literature as a viable alternative for the management of this source of risk. In this direction, this research aimed to develop a proof of concept to verify the feasibility in the creation and transaction of weather derivatives. In order to reach the central study objective, it was necessary to construct and analyze a platform based on Blockchain technology for trading these assets. Subsequently, it was estimated and priced options for the temperature and temperature based on the Alaton, Djehiche and Stillberger (2002) model for three relevant Brazilian locations in the production of agricultural commodities: Jataí (GO), Irati (PR), Rio Verde (GO). Finally, the technical, economic, and legal feasibility of the solutions developed was analyzed and verified. The research is an applied approach. The quantitative methods of economic estimation of contracts were used in parallel with the Design Science Research (DSR) strategy, which methodologically supported the development of proofs of concept and prototypes as a research object. The developed platform comprises two different parts. The frontend consists of a website that interacts with buyers and sellers, resembling the experience of a startup. On the other side, the backend Blockchain carried out all transactions on the platform in a satisfactory manner. The estimated launch costs of the platform were estimated at approximately R\$ 1 thousand reais and maintenance costs of less than one-tenth of this amount. At the same time, the results found in the pricing of contract contracts were estimated from R\$ 80 to R\$ 160 reais, covering a limit value of up to R\$ 6500 per contract. These findings highlight the potential that Blockchain technology can offer to a wide range of solutions as well as the feasibility in trading weather derivatives for Brazilian agribusiness.

Key-words: Blockchain. Smart Contracts. DLT. Weather Derivatives. Climate Risk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Síntese da estrutura do estudo	19
Figura 2 – Estrutura do <i>blockchain</i>	21
Figura 3 – Fluxo de transações no <i>blockchain</i>	22
Figura 4 – Camadas de aplicação <i>blockchain</i>	23
Figura 5 – Arquiteturas <i>permissioned</i> e <i>permissionless</i>	25
Figura 6 – <i>Blockchain</i> em finanças	29
Figura 7 – Esquematização de <i>Payoffs</i> de derivativos climáticos	34
Figura 8 – Fluxo de atividades da aplicação	42
Figura 9 – Plataforma de negociação	53
Figura 10 – Trajetórias simuladas	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das principais contribuições das pesquisas sobre uso de <i>blockchain</i> e derivativos	30
Tabela 2 – Atividades econômicas expostas ao risco climático	32
Tabela 3 – Resumo das principais contribuições das pesquisas sobre uso de derivativos no agronegócio	37
Tabela 4 – Síntese dos tipos e enquadramentos de pesquisa	38
Tabela 5 – Critérios e descrição para DSR	40
Tabela 6 – Síntese das funções do contrato inteligente	44
Tabela 7 – Localidades selecionadas	49
Tabela 8 – Estatísticas descritivas	49
Tabela 9 – Síntese dos custos de <i>gas</i> do contrato	52
Tabela 10 – Parâmetros de estimação	54
Tabela 11 – Prêmio médio estimado	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AML	<i>Anti-Money-Laundering</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARMA	<i>Autoregressive–moving-average model</i>
ARIMA	<i>Autoregressive integrated moving average</i>
ARFIMA	<i>Autoregressive fractionally integrated moving average</i>
B2B	<i>Business-to-business</i>
BaaS	<i>Blockchain-as-a-Service</i>
Bacen	Banco Central do Brasil
CAT	<i>cumulative average temperature</i>
CMN	Conselho Monetário Nacional
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
CDD	<i>cooling degree days</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
DAO	<i>Decentralized autonomous organizations</i>
DAC	<i>Decentralized autonomous corporations</i>
Dapp	<i>Decentralized autonomous applications</i>
DLT	<i>Distribuided Ledger Technology</i>
GARCH	<i>generalized autoregressive conditional heteroskedasticity</i>
GBM	<i>Geometric Brownian Motion</i>
HDD	<i>heating degree days</i>
HBA	<i>historical burn approach</i>
ICO	<i>Initial Coin Offer</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

KYC	<i>Know-Your-Customer</i>
MQO	Minimos quadrados ordinários
OU	Ornstein–Uhlenbeck
P2P	<i>Peer-to-peer</i>
PoD	<i>Proof-of-deposit</i>
PocA	<i>Proof-of-coin-age</i>
PoC	<i>Proof-of-Capacity</i>
PoS	<i>Proof-of-stake</i>
PoeT	<i>Proof of Elapsed Time</i>
PoW	<i>Proof-of-work</i>
SDE	<i>Stochastic Differential Equation</i>
TI	Tecnologia da informação
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	JUSTIFICATIVAS E INOVAÇÕES DO ESTUDO	17
1.3	ESTRUTURA DO ESTUDO	18
2	Fundamentação	20
2.1	Fundamentos da tecnologia <i>blockchain</i>	20
2.1.1	Taxonomia, arquitetura e funcionamento	21
2.1.2	Tipos de <i>blockchain</i> e aplicações subjacentes	24
2.1.3	<i>Smart Contract</i>	26
2.1.4	<i>Oracle</i>	27
2.1.5	Regulação	27
2.1.6	<i>Blockchain</i> como plataforma de produtos financeiros	28
2.1.6.1	<i>Blockchain</i> em derivativos e seguros	29
2.2	Derivativos climáticos	31
2.2.1	Estrutura e funcionamento de derivativos climáticos	32
2.2.2	Breve revisão sobre derivativos climáticos no agronegócio	35
3	METODOLOGIA	38
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	38
3.2	Desenvolvimento do protótipo no <i>blockchain</i>	41
3.3	Modelo, parâmetros e precificação	45
3.3.1	Dados do estudo	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	UMA PLATAFORMA BASEADA NO <i>BLOCKCHAIN</i>	51
4.2	A PRECIFICAÇÃO ESTIMADA DOS DERIVATIVOS PARA AS CIDA- DES SELECIONADAS	54
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔ- MICA E LEGAL DAS SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
5.1	CONCLUSÕES	59
5.2	IMPLICAÇÕES DO ESTUDO	62
5.3	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	62

	REFERÊNCIAS	63
A	APÊNDICES	69
A.1	APÊNDICE A - CONTRATO INTELIGENTE ESCRITO EM LINGUA- GEM <i>SOLIDITY</i>	69
A.2	APÊNDICE B - ALGORÍTIMO DE ESTIMAÇÃO E PRECIFICAÇÃO DE DERIVATIVOS CLIMÁTICOS EM R	79

1 INTRODUÇÃO

A ideia revolucionária que define a fronteira entre os tempos modernos e o passado é o domínio do risco: a noção de que o futuro é mais do que um capricho dos deuses e de que homens e mulheres não são passivos ante a natureza (BERNSTEIN, 1997). Neste contexto, a administração dos riscos envolve uma ampla gama de tomada de decisões de diferentes agentes econômicos. Concomitantemente, instituições financeiras e bancárias desenvolveram e aperfeiçoaram produtos e serviços para o gerenciamento de variadas fontes de risco, como seguros e derivativos. Com o avanço da tecnologia da informação, tais instituições tem adaptado constantemente seus produtos, serviços e modelos de negócio. Nesta direção, o surgimento da tecnologia *blockchain* apresenta-se como um catalisador para mudanças significativas no setor.

Originalmente sistematizado por Nakamoto (2008), o *blockchain* inicialmente estabeleceu um conjunto de regras na forma de cálculos distribuídos que garantem a integridade e disponibilidade dos dados transferidos entre os dispositivos de uma rede *peer-to-peer* (P2P), viabiliza pagamentos e transferências com uma moeda digital denominada *bitcoin*¹ (BAMBARA; ALLEN, 2018; SWAN, 2015; YERMACK, 2017). Na recente literatura, o *blockchain* é delineado como banco de dados digital, com um mecanismo de consenso distribuído que fornece a transmissão e o armazenamento de informações, asseguradas por criptografia e mantidas de maneira permanente e imutável entre os usuários da rede, sem a necessidade de um intermediário central (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; YERMACK, 2017; SWAN, 2015). De modo geral, o *blockchain* compreende uma estrutura de dados, uma camada de tecnologia e um fenômeno social (UPADHYAY, 2019).

O *blockchain*, abrange um conjunto de tecnologias denominadas *Distribuided Ledger Technology* (DLT), tecnologia de registro distribuído (tradução nossa), provê uma plataforma para o desenvolvimento de novas soluções financeiras e monetárias, e o redesenho de produtos e serviços financeiros tradicionais (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Neste contexto, bancos e instituições financeiras sofrerão profundas mudanças no desenho e operação de seus negócios, considerando à medida que a tecnologia e as mudanças nas preferências dos consumidores redefinem a forma como fazem seus negócios, quais soluções oferecem e como ocorre essa interação com a sociedade (COETZEE, 2018).

¹ Para Swan (2015) até o surgimento da tecnologia *blockchain*, o dinheiro digital era como qualquer outro arquivo eletrônico, podendo ser infimamente copiado, sem a capacidade de equacionar o gasto duplo sem a presença de um intermediário de confiança

Embora, tenha originalmente surgido na condição de tecnologia subjacente das moedas digitais (*Bitcoin*), a tecnologia *blockchain* rapidamente evoluiu para uma infraestrutura de computação descentralizada, forneceu capacidade para diversas implementações nas áreas de finanças, seguros, e meios de pagamento (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; SWAN, 2015; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Encontram-se entre os produtos e serviços financeiros, observados frequentemente com as implementações da tecnologia *blockchain*: identidade e segurança de dados (ZHANG et al., 2018); registros financeiros (FANNING; CENTERS, 2016); meios de pagamento (ALLEN; et al., 2016; CONG; LI; WANG, 2020); fundos de investimento (SUBRAMANIAN, 2018; WU; LIANG, 2017); seguros e micro-seguros (BROPHY, 2020; RAIKWAR et al., 2018; POPOVIC et al., 2020; VO et al., 2017) e derivativos (SURUJNATH, 2017; SILVEIRA; CAMILO, 2020). Estes produtos e serviços compreendem um conjunto de processos que podem ser automatizados pela figura de um sistema de compensação, liquidação de títulos e valores mobiliários (derivativos), baseados em contratos inteligentes no *blockchain* (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018).

Neste contexto, instrumentos de gerenciamento de risco climático, derivativos e seguros apresentam-se como soluções para serem desenvolvidas em ambiente de tecnologia *blockchain*. Entre os setores mais afetados pela externalidade da variação climática, o agromercado, turismo, transportes, varejo, aviação, energia e construção civil são particularmente mais afetados (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Entretanto, o aquecimento global e as mudanças climáticas alteram os padrões de temperatura, chuva e vento adiciona-se uma nova camada de risco a estas atividades.

Segundo o IPCC (2018, 2019), até 2050 serão necessários mais de 800 bilhões de dólares para os países lidarem com o aquecimento global. Na mesma direção, o Banco Mundial (2016) estima que anualmente 300 bilhões de dólares sejam perdidos devido as mudanças climáticas. Entretanto, segundo o IPCC (2018, 2019), nos últimos 10 anos apenas 30% dos prejuízos econômicos causados pelas mudanças climáticas estavam cobertos por algum instrumento financeiro. De forma similar, o Fundo Monetário Internacional (2019) estima que em países pobres e em desenvolvimento, a penetração de algum tipo de instrumento de seguro contra o clima seja menor que 1%. Neste contexto, derivativos climáticos e seguros paramétricos apresentam-se como alternativas timidamente exploradas (SILVEIRA; CAMILO, 2020).

Diante do exposto, é apresentado como questionamento central do estudo: **Como um protótipo baseado em tecnologia *blockchain* pode oferecer uma plataforma viável para**

criação, negociação e transação de derivativos climáticos?. Neste contexto, pela natureza da atividade econômica, o agronegócio brasileiro é elencado como potencial mercado para o consumo destes instrumentos. As cidades brasileiras selecionadas para o estudo foram Jataí (GO), Irati (PR) e Rio Verde (GO). Estas localidades apresentam expressiva participação na produção nacional de *commodities* agrícolas como: soja, milho e feijão, bem como lócus tradicional de precificação de tais *commodities*. Em adição, estas localidades possuem a presença de estações meteorológicas ativas.

1.1 OBJETIVOS

O trabalho tem por objetivo geral, propor e desenvolver um protótipo de aplicações para instrumentos financeiros, baseados em tecnologia *blockchain*, mediante um modelo de precificação de derivativos climáticos, para cidades brasileiras com expressiva participação na produção de *commodities* agrícolas. Neste sentido, propõe-se como objetivos específicos:

- Desenvolver e analisar uma plataforma baseada em tecnologia *blockchain* para oferta e negociações de derivativos.
- Estimar e descrever instrumentos de derivativos climáticos para localidades selecionadas.
- Verificar a viabilidade técnica, econômica e legal das soluções desenvolvidas e testadas.

1.2 JUSTIFICATIVAS E INOVAÇÕES DO ESTUDO

O surgimento do *blockchain* trouxe consigo um modelo econômico (distribuído) inteiramente novo para diferentes setores, com diversas implicações ainda não exploradas (MOUGAYAR, 2016). Neste sentido, é extremamente valioso para bancos e instituições financeiras compreenderem de que forma podem utilizar a tecnologia *blockchain* para redesenharem seus produtos e serviços ou criarem produtos, serviços e soluções inteiramente novas.

Em relação aos seguros e derivativos, Brophy (2020), Mougayar (2016), Silveira e Camilo (2020), Raikwar et al. (2018), Popovic et al. (2020), Tapscott e Tapscott (2018) argumentam que a tecnologia *blockchain* oferece uma plataforma adequada para o desenvolvimento de instrumentos financeiros, com baixos custos de operação e transação. Neste contexto, o banco Goldman Sachs (2016) calcula uma economia anual de 11 bilhões de dólares em taxas, despesas operacionais e encargos com a aplicação da tecnologia *blockchain* na compensação

e liquidação de derivativos. Em adição, Mougayar (2016) sugere que, no contexto bancário e financeiro, o sucesso na aplicação da tecnologia *blockchain* pode ser encontrado em territórios adjacentes, controversos e negligenciados.

Por outro lado, o Brasil possui uma expressiva parte de sua economia intimamente dependente do setor agroindustrial. Segundo o IBGE (2020), atualmente o agronegócio compreende 21% do PIB brasileiro. No que concerne o gerenciamento de risco no agronegócio, segundo o Atlas do Seguro Rural no Brasil (2020), o valor pago em prêmios de seguros rurais no Brasil em 2019 ultrapassou os 6,5 bilhões de reais. Entretanto, apenas 20% da área plantada no Brasil possui algum tipo de seguro rural (MAPA, 2020). Neste sentido, as atividades que compreendem o agronegócio são notadamente vulneráveis à variação climática. Paradoxalmente, no Brasil a oferta de instrumentos de gerenciamento de risco climático, na modalidade de derivativos ainda é incipiente.

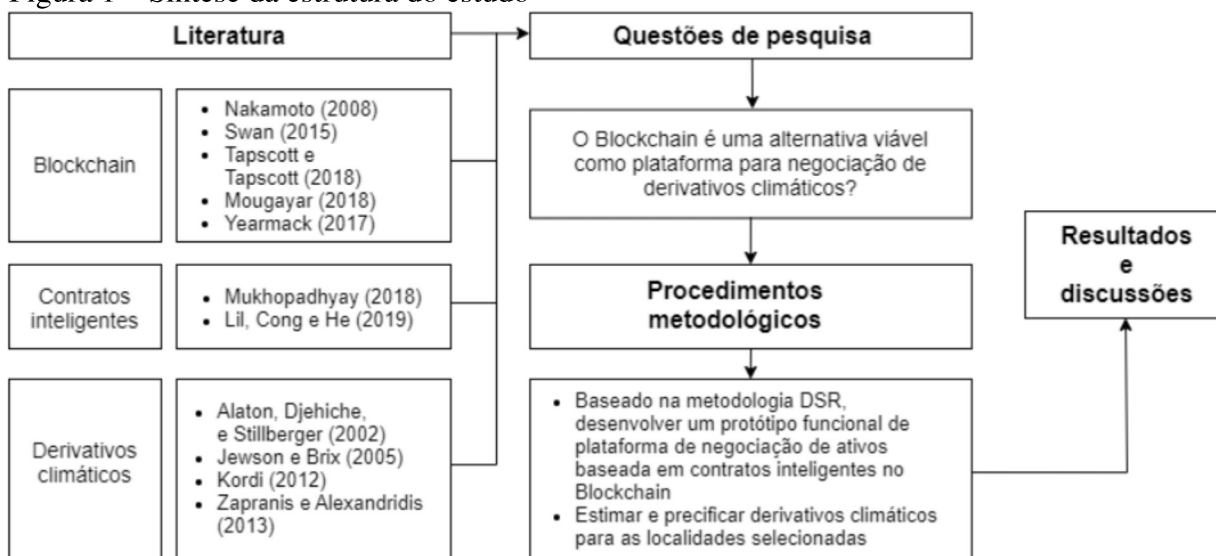
Nesta conjuntura, o *blockchain* assim como derivativos climáticos reside em um território adjacente, controverso e ainda pouco explorado da literatura econômica. Nesta direção, o presente estudo possui um duplo propósito. Primeiramente, contribuirá para a expansão do conhecimento sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* em soluções para bancos e instituições financeiras. Proporciona-se um *road-map* para o desenvolvimento em *blockchain permissionless* de: derivativos climáticos, seguros paramétricos ou instrumentos financeiros análogos. Num segundo momento, o estudo oferece uma alternativa de gerenciamento de risco climático para o agronegócio brasileiro.

Entre as inovações mais relevantes presentes no estudo estão: a união de dois objetos de estudo distintos e suas respectivas abordagens metodológicas, o desenvolvimento de um protótipo funcional, com intuito de apresentar uma solução para um problema prático e a estimação de parâmetros e precificação de contratos de derivativos, por meio de modelo amplamente utilizados na literatura ainda não aplicados para cidades brasileiras.

1.3 ESTRUTURA DO ESTUDO

Esta dissertação estrutura-se em cinco capítulos: Introdução; Fundamentação Teórica; Materiais e Métodos; Resultados e Análise dos Resultados. Na presente seção está apresentado os aspectos gerais da pesquisa como tema, problema e questão norteadora, conjuntamente com os objetivos geral, específicos e justificativas. A figura 1 apresenta uma síntese da estrutura de pesquisa.

Figura 1 – Síntese da estrutura do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda seção é apresentado os fundamentos teóricos que subsidiam a análise e entendimento dos objetos de estudo. O primeiro eixo teórico abrange os instrumentos de gerenciamento de risco climático. Em outro eixo teórico, o entendimento sobre a tecnologia de registro distribuído, *blockchain*. Na terceira seção é delineado os procedimentos metodológicos adotados. Desde o desenvolvimento e precificação do derivativo climático até sua implementação em ambiente *blockchain*. Na quarta seção é apresentado os resultados do experimento desenvolvido. Na última seção são apresentadas as contribuições encontradas pelo estudo, bem como as delimitações e sugestões para futuros estudos. Ao final têm-se as referências e apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar o referencial teórico acerca da tecnologia *blockchain*, sua taxonomia, funcionamento e aspectos técnicos mais relevantes. Em seguida, contextualizam-se derivativos climáticos, suas especificações e modelos de precificação mais adequados. Para ambos, os eixos temáticos são apresentados uma breve revisão de literatura.

2.1 FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA *BLOCKCHAIN*

As primeiras tentativas em teorizar um mecanismo de registro de valor imutável, seguro e minimamente descentralizado foram apresentadas por Haber e Stornetta (1991)¹. Entretanto, o conceito contemporâneo de *blockchain* é apresentado no *paper* “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”, disponibilizado na internet em 2008 atribuído a Satoshi Nakamoto². Inicialmente, a proposta de Nakamoto (2008) era prover um sistema computacional baseado em um mecanismo de validação criptográfica, que permitisse a transação de ativos digitais sem a necessidade de um intermediário (BAMBARA; ALLEN, 2018; SWAN, 2015; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Entretanto, rapidamente a tecnologia *blockchain* recebeu diversas implementações e melhorias em sua arquitetura, desdobrou-se em outros sistemas *blockchain*, permitiu a implementação e o redesenho de serviços tradicionalmente disponibilizados por meio de intermediários como bancos, seguradoras, empresas e governo (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018; SWAN, 2015).

O *blockchain* pode ser caracterizado por três recursos específicos. Primeiro, *blockchain* é uma tecnologia de dados distribuídos que viabiliza a transparência das transações armazenadas (BAMBARA; ALLEN, 2018; BERG; DAVIDSON; POTTS, 2017; CATALINI; GANS, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Em segundo lugar, o *blockchain* assume a forma de um livro razão imutável, garante uma única versão da verdade que ajuda a construir a confiança nas informações armazenadas (BAMBARA; ALLEN, 2018; BERG; DAVIDSON; POTTS, 2017; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017; CATALINI; GANS, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Terceiro, um *blockchain* permite a execução automática de transações (BAMBARA; ALLEN, 2018; BERG; DAVIDSON; POTTS, 2017; CATALINI; GANS, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Em síntese, as características fundamentais da tecnologia *blockchain* é des-

¹ O desenho original de Haber e Stornetta (1991) consistia em um sistema para registro de propriedades intelectuais e patentes, efetuado por meio de uma função hash os quais receberiam um carimbo de tempo, posteriormente organizados e disponibilizados em fóruns para consulta da partes.

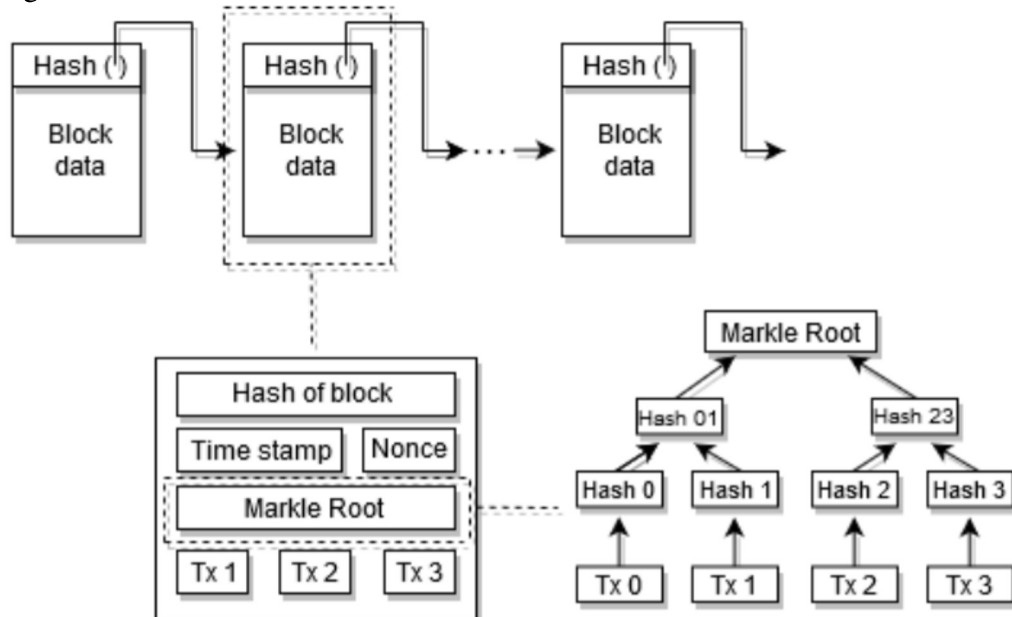
² As especulações sobre a verdadeira identidade de Nakamoto tem se concentrado principalmente em uma série de especialistas em criptografia e ciência da computação de descendência não japonesa, que vivem nos Estados Unidos e na Europa (BAMBARA; ALLEN, 2018).

centralização do controle, transparência, privacidade, imutabilidade e acordo sobre o estado e a verdade das informações.

2.1.1 Taxonomia, arquitetura e funcionamento

Em linhas gerais, o *blockchain* é uma base de dados distribuída, transparente, imutável, pseudo-anônima, validada e protegida por criptografia, nas quais as transações são realizadas sem um intermediário e a confiança é garantida pelo consenso de usuários (BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017; MORKUNAS; PASCHEN; BOON, 2019; SWAN, 2015; YERMACK, 2017). Para Moura (2019), o *blockchain* é parte banco de dados, parte plataforma de desenvolvimento, parte viabilizador de rede, todos com muitas instâncias e variações. Tapscott e Tapscott (2018) define o *blockchain* como um código-fonte aberto, gratuito e acessível para o desenvolvimento de ferramentas de gerenciamento de transações on-line. Em termos mais abrangentes, Yuan e Wang (2018) aponta o *blockchain* como um conjunto combinado de tecnologias existentes nos campos de criptografia, economia e ciências da computação. Além disso, uma característica fundamental da abordagem do *blockchain* é que as alterações no registro (seja a adição de novos ativos, *tokens* digitais e sua reatribuição a um proprietário diferente) são comunicadas e, então por meio de um processo, registradas para que possam ser configuradas de forma confiável como o 'estado' do sistema (HALABURDA et al., 2020). Em outros termos, *blockchain* se refere a livros-razão digitais distribuídos que empregam consenso distribuído para criar uma única versão da verdade.

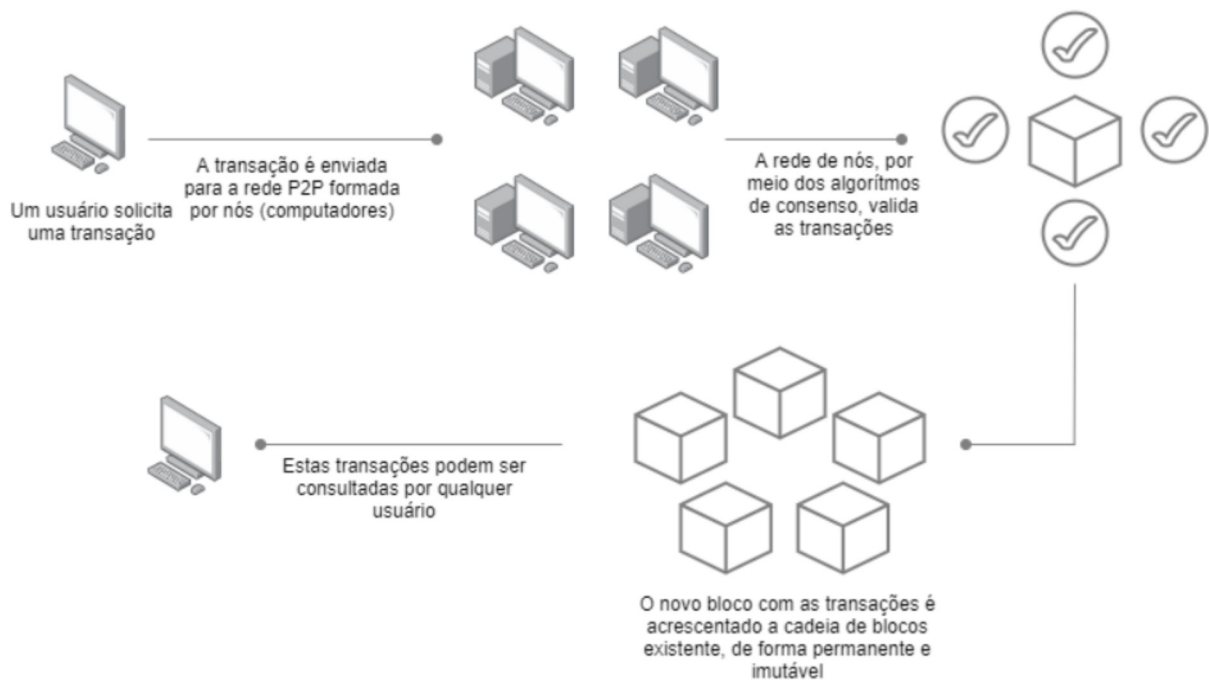
Figura 2 – Estrutura do *blockchain*



Fonte: Elaborado pelo autor

Em termos técnicos, no *blockchain* as transações são recebidas, organizadas e inseridas em blocos (as transações são condensadas em um sistema hierárquico separado de *hash-pointers* conhecido como árvore *Merkle*, no cabeçalho são armazenados um conjunto de metadados que compreendem a versão do bloco (*Block version*); *hash* anterior; registro de tempo (*time-stamp*); incremento (*nonce*) e número destino do *hash* em formato compacto). Posteriormente, os blocos são organizados em sequência cronológica por meio de funções *hash*. Paralelamente, é fornecida pelo remetente da transação uma assinatura criptográfica única, que garante a integridade e autenticidade do registro e, em seguida, envia para uma rede P2P de computadores (comumente, "mineradores" ou servidores privados fornecem um poder computacional) para processamento, autenticação e inserção no livro-razão digital (todas as transações no *blockchain* são vinculadas as registradas anteriormente, fornecendo um histórico irreversível e verificável das transações). A figura 3 constitui uma síntese do processo de transação no *blockchain*.

Figura 3 – Fluxo de transações no *blockchain*



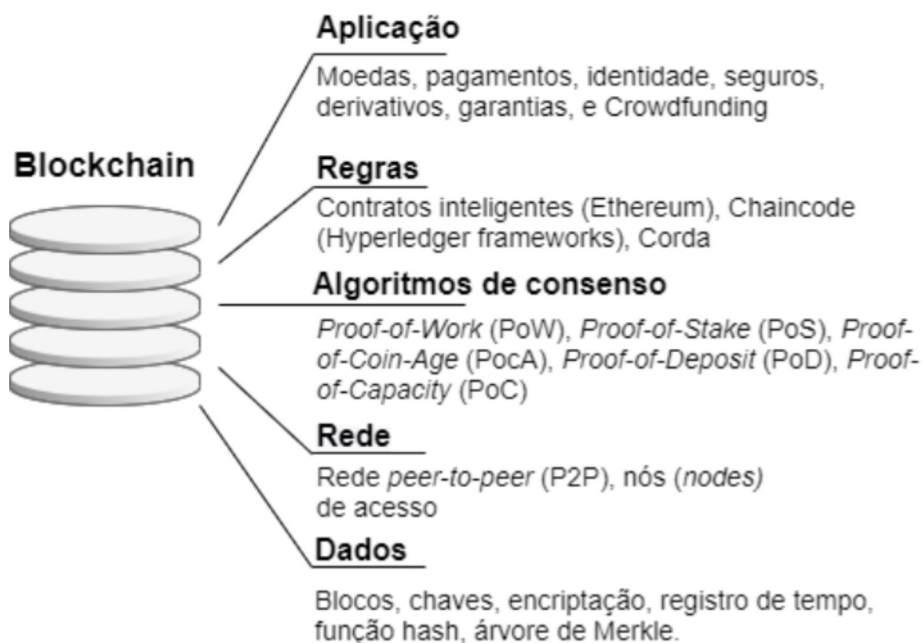
Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação as propriedades técnicas do *blockchain*, o presente estudo sistematizou em camadas para otimizar o entendimento da tecnologia. A camada de dados compreende os principais mecanismos para acessar e manipular as informações em ambientes de registro distribuído. Neste âmbito, os diferentes *blockchain* existentes, empregam uma variada combinação de linguagens de programação, conjunto de regras e mecanismos os quais configuram o

código-fonte dos respectivos *blockchain* (BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018; SWAN, 2015).

A camada de rede compreende parte essencial da arquitetura *blockchain*, o mecanismo de rede distribuída P2P, permite o registrar, transacionar e validar ações em um ambiente descentralizado.(BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018; SWAN, 2015). A camada imediatamente superior engloba os algoritmos de consenso. Na figura 4, as propriedades técnicas da tecnologia *blockchain* são sistematizadas em seis camadas específicas.

Figura 4 – Camadas de aplicação *blockchain*



Fonte: Elaborado pelo autor

O consenso é uma questão fundamental em sistemas distribuídos, ele possibilita que os diversos participantes convergem em decisões comuns, e garantem a manutenção e a consistência dos dados (BAMBARA; ALLEN, 2018; SWAN, 2015). Em síntese, o mecanismo de consenso pode ser descrito como um conjunto de etapas e procedimentos tomadas por todos, ou a maioria dos participantes. Para chegar a um acordo sobre um estado ou valor proposto, os mecanismos comumente empregados em *blockchain* são: *Proof-of-work (PoW)*, ou prova de trabalho, e *Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)*, ou tolerância a falhas bizantinas (BAMBARA; ALLEN, 2018; MUKHOPADHYAY, 2018; SWAN, 2015). A PoW solicita aos nós que desafiem-se repetidamente para realizar o cálculo para validar os dados, diferentemente para a PBFT, cada nó da rede executa a operação de acordo com as informações da

transação, assim que a operação termina e o nó individual tem a decisão a tomar (BAMBARA; ALLEN, 2018; MUKHOPADHYAY, 2018). Entre outros algoritmos não negligenciáveis estão: *Proof-of-stake* (PoS); *Proof-of-coin-age* (PocA); *Proof-of-deposit* (PoD), em outra abordagem encontra-se *Proof-of-Capacity* (PoC) e *Proof of Elapsed Time* (PoeT)(BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018; SWAN, 2015).

A camada de regra e contratos constitui a superfície da tecnologia *blockchain*. Ela abrange o conjunto de mecanismos e regras de funcionamento que permitem algoritmos, *tokens* e *smart contracts* implementarem as regras de negócios e suas aplicações (BAMBARA; ALLEN, 2018; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Assim, o universo de aplicações desenvolvidas com tecnologia *blockchain* compreendem diversas áreas como *smart contracts* para registros de propriedade, identidade e seguros, *tokens* para meios de pagamento e garantias legais, algoritmos de *crowdfunding*.

2.1.2 Tipos de *blockchain* e aplicações subjacentes

Essencialmente, a tipologia contemporânea da tecnologia *blockchain* pode ser descrita como, arquitetura de registro distribuído do tipo *permissionless* ou *permissioned*, com e sem permissão (tradução nossa), e ou pública ou privada (BAMBARA; ALLEN, 2018; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Os *blockchain* do tipo *permissionless*, sem permissão, referem-se a sistemas de registro e consulta de dados aberto a todos os usuários, sem restrições de acesso, lendo e escrevendo dados, portanto limitado apenas pelas próprias regras da intrínsecas (BAMBARA; ALLEN, 2018; MORKUNAS; PASCHEN; BOON, 2019; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Em outra direção, *blockchain* do tipo *permissioned*, permitido ou autorizado, a entrada e acesso precisa ser autorizada por um ou mais nós, esse tipo de arquitetura pode possuir regras adicionais sobre acesso, escrita e leitura de dados (BAMBARA; ALLEN, 2018; MORKUNAS; PASCHEN; BOON, 2019; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). A síntese das arquiteturas e suas respectivas características podem ser observadas na figura 4.

Os diferentes *blockchain* que surgiram após a popularização do *Bitcoin* empregaram novos arranjos e combinações em suas arquiteturas, sejam *permissioned* ou *permissionless* (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Entretanto, todos eles compartilham características centrais como: ausência de um entidade centralizadora; ausência da necessidade de confiança entre as partes; rastreabilidade; anonimato (do usuário não do nó); transparência; impossibilidade de alteração dos dados e dependência de

Figura 5 – Arquiteturas *permissioned* e *permissionless*

	<i>Permissioned</i>	<i>Permissionless</i>
Público	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada, acesso e leitura permitida a todos os usuários. • Somente nós autorizados podem subscrever informações. • Limitado potencial de escalabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada, acesso, leitura e escrita permitida a todos os usuários. • Limitado somente pelas regras intrínsecas a tecnologia. • Reduzido potencial de escalabilidade.
Privado	<ul style="list-style-type: none"> • Somente usuários autorizados podem acessar e ler informações. • Somente nós autorizados podem subscrever informações no <i>Blockchain</i>. • Geralmente utiliza servidores e <i>hosts</i> privados ou corporativos. • Alto potencial de escalabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada, acesso e leitura permitida e escrita permitida somente para usuários selecionados. • Somente nós autorizados podem subscrever informações. • Elevado potencial de escalabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor

regras próprias para manutenção da rede (BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018; SWAN, 2015). Nesta direção, diversas aplicações subjacentes para diversas necessidades foram desenvolvidas e implementadas utilizando as características da arquitetura *blockchain*.

Além de permitir a criação e lançamento de criptomoedas por meio de *Initial Coin Offer* (ICO), oferta inicial de moedas (tradução nossa), e sua posterior transação, plataformas *blockchain* com variações foram desenvolvidas e implementadas fornecendo soluções *business-to-business* (B2B) para diversos segmentos, a exemplo *Hyperledger*, *Ethereum*, *ChainLink* e *Corda* (BAMBARA; ALLEN, 2018; BEHNKE; JANSSEN, 2019; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018).

Nesta direção, a emergência de serviços como *blockchain-as-a-Service* (BaaS), *blockchain* como serviços (tradução nossa), proporciona condições para que as empresas usem soluções baseadas na nuvem para criar, hospedar e implementar seus próprios aplicativos *blockchain* (BAMBARA; ALLEN, 2018; SWAN, 2015; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Conseqüentemente, novos desenhos organizacionais surgiram com a adoção da tecnologia *blockchain* como *decentralized applications* (Dapps) aplicações descentralizadas (tradução nossa), *decentralized*

autonomous organizations (DAO) organizações autônomas descentralizadas (tradução nossa) e *decentralized autonomous corporations* (DAC) corporações autônomas descentralizadas (tradução nossa) (BAMBARA; ALLEN, 2018; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018; SWAN, 2015).

2.1.3 *Smart Contract*

Entre as principais inovações proporcionadas pela tecnologia *blockchain*, a possibilidade de implementar contratos autoexecutáveis constitui-se notadamente uma das mais relevantes. Inicialmente, teorizado por Nick Szasbo, os *Smart contracts*, contratos inteligentes (tradução nossa), rapidamente configuraram no grupo de aplicações disponíveis na tecnologia *blockchain* (BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017). Entretanto é com a introdução da *Ethereum Virtual Machine* (EVM) que o desenvolvimento de contratos inteligentes autoexecutáveis ganhou sua plataforma mais robusta (BAMBARA; ALLEN, 2018; DHILON; METCALF; HOOPER, 2017). Este *blockchain* é uma plataforma com Turing-Completo³ que permite a escrita e execução de contratos inteligentes em *blockchain*. A escrita destes algoritmos utiliza a linguagem *Solidity*, baseada em *Javascript*, *C++*, *Python* e *PowerShell*.

No contexto *blockchain*, *smart contracts* pode ser sistematizado como um conjunto pré definido de regras contratuais⁴ entre partes distintas, definidas na forma de um algoritmo, expressa em linguagem de programação, mediadas e implementadas em um *ledger* distribuído e operacionalizado de forma autoexecutável (BAMBARA; ALLEN, 2018; MUKHOPADHYAY, 2018; SWAN, 2015; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Entre as características dos *smart contracts* estão a auto verificação; auto execução e resistência a adulteração (BAMBARA; ALLEN, 2018; MUKHOPADHYAY, 2018; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Esta arquitetura de contratos inteligentes permitem que as condições acordadas sejam cumpridas sem a necessidade de acionar um intermediário central, implica diretamente nos custos de transação (BAMBARA; ALLEN, 2018; MUKHOPADHYAY, 2018). Entretanto, contratos inteligentes não são a lei em si, em sua forma de algoritmos e programas de computador constitui apenas uma tecnologia capacitadora (MOUGAYAR, 2016).

³ Quando as regras seguidas em um conjunto de dados arbitrários podem produzir resultados de quaisquer cálculos, diz-se que a linguagem ou algoritmo computacional é Turing-Completo (BAMBARA; ALLEN, 2018)

⁴ Moura (2019) aponta a complexa relação entre as inovações providas pela tecnologia *blockchain* e as possibilidades de aplicações baseadas em *smart contracts* e o aparato regulatório brasileiro.

2.1.4 Oracle

A operacionalização das regras contratuais em *smart contracts* é possível devido ao desenvolvimento de *Oracle*, ou oráculo. Segundo Mukhopadhyay (2018), a figura do oráculo permite aos contratos inteligentes e o *blockchain*, receber e integrar informações externas de forma automatizada e segura. Mougayar (2016) sugere que o oráculo direciona o comportamento do contrato inteligente. Para Bambara e Allen (2018), Swan (2015) os oráculos ligam o *blockchain* ao mundo externo e fornece fatos que afetam a validade das transações. Estes oráculos contêm uma representação das informações externas, tais como, identidades, propriedades e saldos (MOUGAYAR, 2016).

De modo geral, o oráculo pode ser sistematizado como um agente externo ao *blockchain*, localiza, verifica e envia informações do exterior da rede para o interior da mesma, para que estas informações possam ser analisadas pelo algoritmo do *smart contract* (MUKHOPADHYAY, 2018). Entre os Oráculos mais utilizados na rede EVM estão, o *Provable*⁵ e *Chainlink*⁶.

2.1.5 Regulação

No *blockchain*, "*code is law*". Neste contexto, a adoção de soluções baseadas em *blockchain*, seja uso de criptomoedas, contratos inteligentes, emissão de ICOs ou qualquer outra aplicação representam questões regulatórias sem precedentes que governos e reguladores precisam avaliar. Para Popovic et al. (2020) a legislação e a regulamentação geralmente não acompanharam os desenvolvimentos no espaço do *blockchain*.

Entre os aspectos mais relevantes sobre as regulações acerca da tecnologia *blockchain* no contexto financeiro estão: as exigências na identificação dos usuários para adequação as normas de *Know-your-Customer* (KYC) e *Anti-Money-Laudry* (AML), incerteza sobre a territorialidade e a definição sob quais regimes jurídicos, futuras discussões sobre o que é observado no *blockchain* (cada nó pode estar sujeito a um regime jurídico diferente) será realizado e sobre a incerteza no âmbito geral sobre o status regulatório dos criptoativos e sua utilização como ativo, moeda e meios de pagamento (YEOH, 2017; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2018). Neste sentido, os *blockchains* do tipo *permissioned* oferecem condições para desenvolver aplicações sem o uso de criptomoedas e com possibilidade de incluir exigências de identificação dos usuários ou nós, adequa-se mais facilmente a regulações impostas pelas

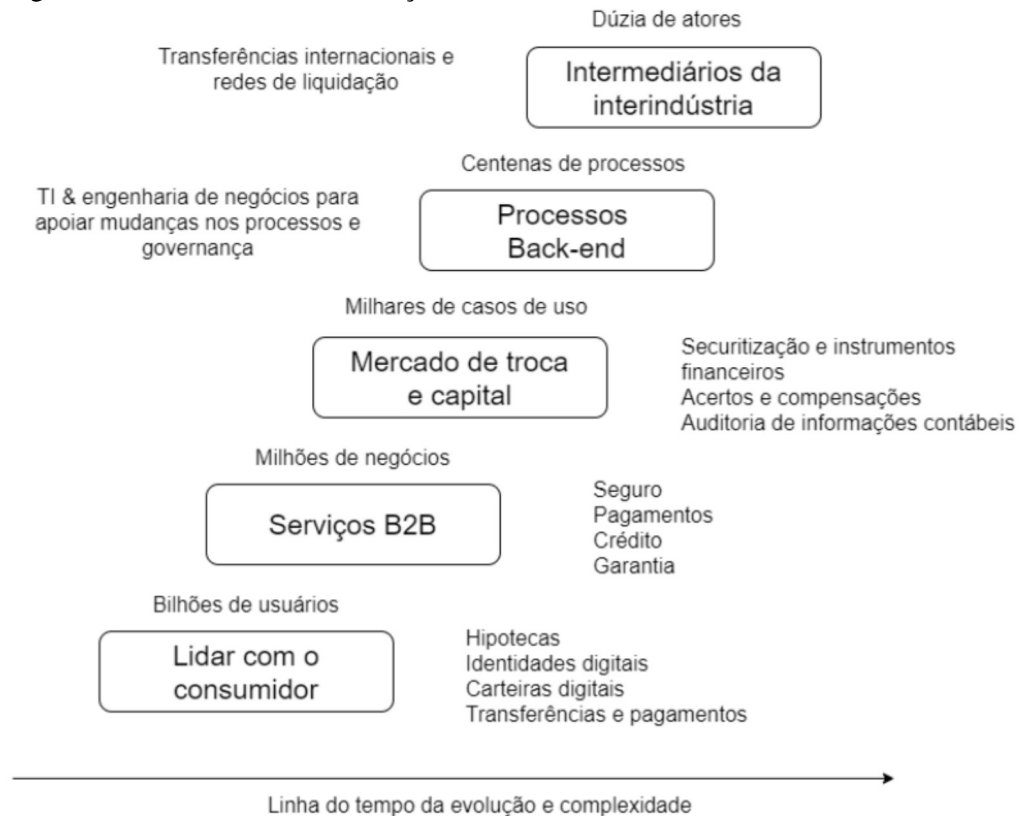
⁵ Disponível em <https://provable.xyz/>

⁶ Disponível em <https://chain.link/>

autoridades dos respectivos países. Entre as diversas iniciativas para regulação do *blockchain* no Brasil os projetos de leis PL 2.876/2020 e PL 3.443/2019 destacam-se pois, estabelecem que “que cada registro de título e documento deverá ser feito também no Sistema Eletrônico de *blockchain* Nacional de Registro de Títulos e Documentos” e "preveem o uso do *blockchain* de forma geral no serviço público".

2.1.6 *Blockchain* como plataforma de produtos financeiros

A indústria financeira contemporânea tem em seus produtos e serviços alta dependência de tecnologia da informação (THAKOR, 2014). Segundo King (2019), o setor financeiro atual apenas reproduz antigos modelos de negócios com novos canais de distribuição. Neste contexto, Bambara e Allen (2018) sugerem, instituições financeiras que encontrarem maneiras de adotar e aplicar a tecnologia de *blockchain*, ganharão vantagens competitivas ao entregar soluções com um tempo de entrada no mercado mais rápido a um custo reduzido. Nesta direção, Mougayar (2016) divide o horizonte de aplicações e serviços financeiros no *blockchain* em três setores: infraestrutura e protocolos básicos; *middleware* e serviços e aplicações e soluções.

Figura 6 – *Blockchain* em finanças

Fonte: Adaptado de Mougayar (2016)

De forma similar, Tapscott e Tapscott (2018) sugerem que as principais adições que a tecnologia *blockchain* oferece ao sistema financeiro são: atestação (capacidade de verificar a identidade e estabelecer a confiança do intermediário financeiro); redução de custos operacionais (a rede *blockchain* permite a alocação mais eficiente da infraestrutura computacional no processamento de transações); velocidade (o *blockchain* de *Bitcoin* pode processar as transações em até 10 minutos, entretanto outros algoritmos podem reduzir este tempo de forma significativa); redução do risco (a natureza do mecanismo de registro distribuído permite a redução de diversas fontes de risco como: de liquidação e de crédito) e inovações de valor (o *blockchain* é uma fonte de código aberto que permite a experimentação e inovação de diversas maneiras, como a criação ou combinação de novos produtos ou redesenho de serviços já existentes).

2.1.6.1 *Blockchain* em derivativos e seguros

Para usos específicos, Bambara e Allen (2018), Mougayar (2016), Tapscott e Tapscott (2018) destacam que o *blockchain* pode oferecer uma plataforma extremamente adequada para a negociação de derivativos com baixos custos de operação. Os estudos mais relevantes estão sistematizados na tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das principais contribuições das pesquisas sobre uso de *blockchain* e derivativos

Autor	Contribuição
Biryukov, Khovratovich e Tikhomirov (2016)	O artigo desenvolve uma linguagem específica de domínio financeiro (DSL) e derivativos denominada Findel.
Ciocarlie e Eldefrawy (2018)	Os autores desenvolveram um sistema de monitoramento contínuo baseado em <i>blockchain</i> para seguro denominado BlockCIS.
Oham et al. (2018)	O estudo propõe o desenvolvimento e utilização de uma estrutura baseada em reclamações de seguros de automóveis baseadas em <i>blockchain</i> , denominada B-FICA.
Raikwar et al. (2018))	Os autores projetaram uma plataforma <i>blockchain</i> com <i>Hyperledger</i> para suporte à execução de transações em processos de seguros.
Riasanow e Hermes (2020)	O estudo conduziu um exame sobre as semelhanças da transformação digital em cinco ecossistemas de plataforma: automotivo, <i>blockchain</i> , financeiro, seguro e IIoT.
Sheth e Subramanian (2018)	Os autores desenharam e desenvolveram seguros baseados em contratos inteligentes em <i>blockchain Ethereum</i> .
Silveira e Camilo (2020)	Os autores desenvolveram um contrato inteligente para criação e negociação de opções de <i>call</i> para temperatura de duas cidades brasileiras.
Surujnath (2017)	Os autores examinam a funcionalidade do <i>blockchain</i> e seus aplicabilidade aos mercados de derivativos.
Vaklinia, Badsha e Sengupta (2018)	Motivado pela necessidade em transferir seus riscos cibernéticos para seguradoras com o objetivo de mitigar o custo de ameaças cibernéticas.
Vo et al. (2017)	Os autores desenvolvem soluções baseadas em <i>blockchain</i> para gerenciar e analisar dados de forma transparente em um aplicativo de seguro de automotivo pré-pago.

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 DERIVATIVOS CLIMÁTICOS

Um derivativo pode ser definido como uma classe de instrumentos financeiros cujo valor depende (ou deriva) de um ativo subjacente (HULL, 2016). De forma geral, este tipo de contrato instrumentaliza a operação com liquidação em data futura e permite a transferência de parte do risco da atividade para investidores, seguradoras ou especuladores. Para Hull (2016), a principal função dos instrumentos de derivativos consiste na redução da incerteza sobre os preços dos ativos subjacentes, mitigação do risco de preço ou risco de mercado. Segundo Giambiagi (2017), as principais funções dos derivativos são: *hedge* como operações de proteção, arbitragem de preços entre diferentes mercados ou ativos e a especulação. Dentre os principais tipos de derivativos estão, os contratos a termo, os contratos futuros, as opções e os swaps (HULL, 2016). No que concerne o entendimento legal dos derivativos no Brasil, a legislação optou por atribuir para a Comissão de Valores Mobiliários (CVM)⁷ a regulação destes instrumentos.

Neste contexto, os derivativos climáticos operam de forma similar aos instrumentos tradicionais, toma como ativo subjacente variáveis climatológicas como: temperatura, chuva, neve, vento, ou qualquer outro indicador de tempo e clima verificável (CAO; WEI, 2004; JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). A primeira transação pública de derivativos climáticos foi registrada em 1997, entre a Koch Energy e Enron Corporation (ALATON; DJEHICHE; STILLBERGER, 2002; JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Rapidamente, o mercado de clima expandiu-se para diversos países na Europa, Ásia e Oceania (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Em setembro de 1999, a *Chicago Mercantile Exchange* (CME) iniciou a negociação de derivativos climáticos para 10 cidades norte americanas (ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013).

Comumente, os derivativos climáticos são estruturados como contratos de opções europeias e asiáticas (*call* e *put*) e *swap* com base em índices de temperatura acumulada, pluviosidade e neve (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Como pode ser observado na tabela 1, a estrutura e funcionamento dos derivativos climáticos permitem sua utilização para gerenciar riscos em uma variada gama de atividades econômicas. Segundo Hull (2016), para esses negócios, faz sentido considerar o *hedge* de seu risco climático da mesma maneira que realizam o *hedge* dos riscos cambiais ou de taxas de juros.

⁷ Desde 2001 os derivativos estão sob a competência da CVM, passando a compor o rol de valores mobiliários do art. 2º da Lei 6385/76. Entre as principais regulações estão as instruções da CVM nº 461/07, 467/07 e 475/08 e as instruções do Conselho Monetário Nacional (CMN) nº 3505/07, 3824/09 e 3833/09

Tabela 2 – Atividades econômicas expostas ao risco climático

<i>Hedge</i>	Evento climático	Risco
Agronegócio	Temperatura, Precipitação, Granizo e Vento	Perda ou redução significativa da produtividade.
Indústria de energia (produtores e consumidores)	Temperatura e Chuva	Redução na demanda de energia elétrica durante invernos quentes e verões frios.
Companhias aéreas e aeroportos	Ventos, Temperatura e Neve	Cancelamento e atraso de voos.
Turismo e hotelaria (Hotéis, museus, atrações turísticas)	Vento, Temperatura, Neve e Chuva	Redução do fluxo de visitante/turistas durante períodos com eventos extremos ou ausência de condições meteorológicas adequadas.
Construção civil	Temperatura, Neve e Chuva	Impossibilidade ou atrasos no cumprimento de contratos devido a condições extremas.

Fonte: Elaborado pelo autor a parti de Jewson e Brix (2005), Zapranis e Alexandridis (2013)

Concomitantemente, Zapranis e Alexandridis (2013) sugerem derivativos climáticos na criação de portfólio de investimentos mais diversificados. De forma similar, Jewson e Brix (2005) apontam que devido a alta correlação entre o clima e os preços de algumas *commodities*, retornos expressivos podem ser obtidos por meio de um portfólio que contenha derivativos climáticos conjuntamente com negociações de *commodities*.

2.2.1 Estrutura e funcionamento de derivativos climáticos

Um contrato de derivativo climático padrão, comumente apresenta os seguintes atributos: tipologia de contrato (*swap*, *call* ou *put*); ativo subjacente (variável climática); periodicidade (início e vencimento da operação), fonte de informações climáticas (estação meteorológica) e função de *payoff* com as condições de *strike*, um multiplicador *tick* e demais condicionantes (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013; ZENG, 2000).

Usualmente, as variáveis climáticas subjacentes são escritas na forma de *heating degree days* (HDD), graus-dia de aquecimento (tradução nossa), *cooling degree days* (CDD), graus-dia de resfriamento (tradução nossa) ou *cumulative average temperature* (CAT), graus-dia acumulado (tradução nossa) (HULL, 2016; JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Os valores de HDD, CDD e CAT consistem na diferença entre uma tempera-

tura média⁸ observada e uma temperatura limite previamente definida (JEWSON; BRIX, 2005; HULL, 2016; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Neste sentido, a quantidade de HDD ou CDD acumulado para um período n pode ser observada pelas equações a seguir.

$$I_n^H = \sum_{i=1}^n HDD \quad (2.1)$$

$$I_n^C = \sum_{i=1}^n CDD \quad (2.2)$$

De acordo com Jewson e Brix (2005), Hull (2016), Kordi (2012), Zapranis e Alexandridis (2013), usualmente os contratos de *call* e *put* possuem um "cap", um limite no retorno máximo. Neste sentido, as opções climáticas de *call* e *put* funcionam de forma análoga ao um *spread* de alta ou baixa em vez de opções no sentido tradicional (JEWSON; BRIX, 2005; HULL, 2016; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Segundo Kordi (2012), o *payoff* das funções de *call* ou *put* climática pode ser obtido seguindo as equações a seguir.

$$call = \delta max(0, I_n^K - K) \quad (2.3)$$

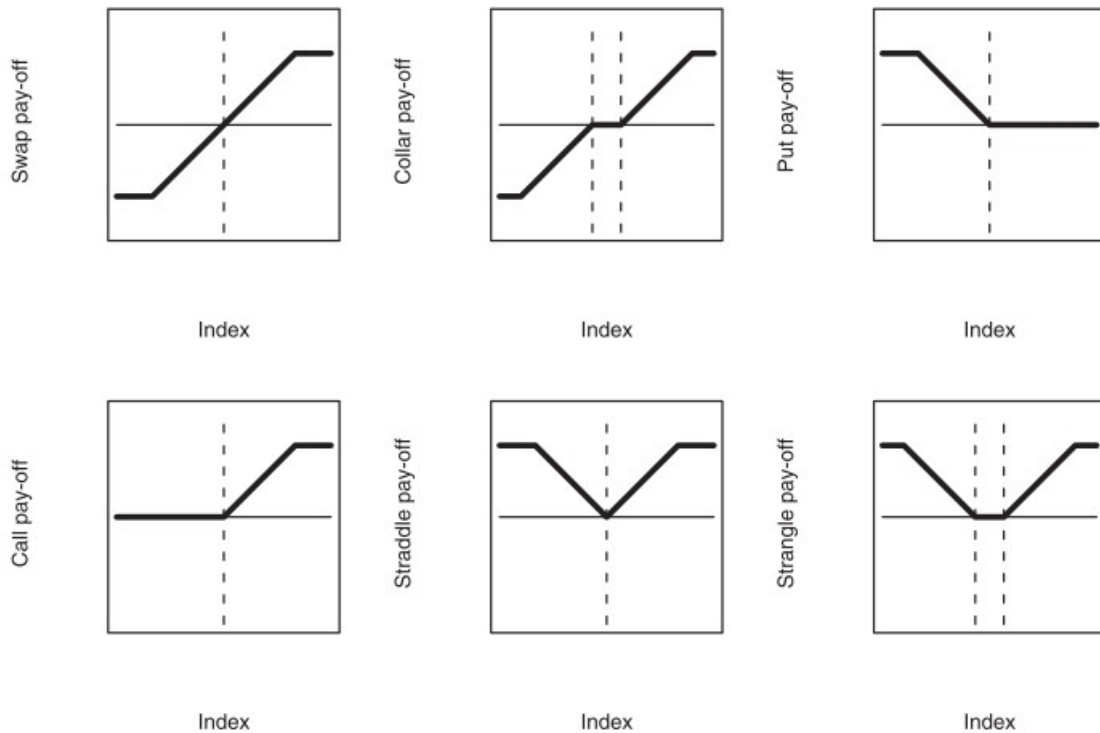
$$put = \delta max(0, K - I_n^H) \quad (2.4)$$

Em que, δ representa os valores do multiplicador *tick* para os valores de *degree-day* e K indica o valor de *strike*. No entanto, outras configurações de contratos de derivativos climáticos podem ser encontradas no mercado de balcão.

Paralelamente, as configurações alternativas comumente encontradas nos contratos de derivativos climáticos assumem a forma de: operação com posição de *Collar*, consiste em uma combinação de compra (*long call*) e venda (*short put*) com *strike* diferente, mas o mesmo valor de *tick*; *Strangle*, equivale em uma compra (*long call*) e uma venda (*long put*), geralmente com *strike* diferentes, estes usualmente com valores de *strike* na venda (*long put*) menores que da compra (*long call*) e *Straddle* constitui-se em uma compra (*long call*) e uma venda (*long put*) com o mesmo *strike*, *tick* e limite (JEWSON; BRIX, 2005).

⁸ No contexto de derivativos climáticos, a temperatura média é dada por: T_i , onde T_i^{max} e T_i^{min} denota as temperaturas máxima e mínima (em graus Celsius) medidas para o dia i . Consequentemente, a temperatura média para o dia i é dada por: $T_i = \frac{T_i^{max} + T_i^{min}}{2}$.

Figura 7 – Esquemática de *Payoffs* de derivativos climáticos



Fonte: Jewson e Brix (2005)

Existe ainda a possibilidade do emprego de estratégias personalizadas como funções binárias, cestas (*basket*) com múltiplos índices de *strike* ou contratos ajustados a complexidade e necessidade do gerenciamento do risco (JEWSON; BRIX, 2005).

No que diz respeito à estimativa de parâmetros e preços para derivativos climáticos, a literatura recente oferece abordagens diferenciadas. Tradicionalmente, opções são precificadas por meio do método de Black e Scholes (1973). Entretanto, os derivativos de clima são diferentes de derivativos tradicionais devido ao seu índice de clima subjacente (HDD, CDD, CAT, etc.) que não pode ser negociado (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Além disso, o mercado correspondente é relativamente ilíquido, conseqüentemente, a arbitragem de preços não pode ser aplicada diretamente a estes contratos, constitui-se assim um mercado clássico incompleto (ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013).

Neste contexto alternativo, Jewson e Brix (2005), Zapranis e Alexandridis (2013) sugerem métodos como a abordagem atuarial ou *historical burn approach* (HBA), abordagem de queima diária (tradução nossa), para ser utilizados para precificar um contrato (*call* e *put*) de clima sem realmente modelar a dinâmica da temperatura. Alternativamente, pode-se modelar diretamente o índice correspondente, a saber, "modelagem de índice", como o índice HDD, o índice CDD, o índice CAT (ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Nesta direção, duas es-

estratégias são majoritariamente encontradas. Benth e Benth (2007), Cao e Wei (2004), Cao, Li e Wei (2003) fazem uso de modelos (e variações) autoregressivos (ARMA, ARIMA, SARIMA, AROMA, SAROMA, ARFIMA, GARCH). Por outro lado, Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), Benth e Benth (2007), Benth e Persio (2018), Göncü (2011) sugerem uma equação diferencial estocástica de difusão de temperatura. Os processos contínuos usados para modelar temperaturas diárias geralmente assumem uma forma reversa à média (Ornstein-Uhlenbeck), que deve ser discretizada a fim de estimar seus vários parâmetros (ALATON; DJEHICHE; STILLBERGER, 2002; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Em adição, dada a forma complexa do processo e a natureza dependente do caminho da maioria dos *payoffs*, a precificação geralmente não resulta soluções completas, nesse caso, simulações de Monte Carlo (MC) são empregadas (ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013).

2.2.2 Breve revisão sobre derivativos climáticos no agronegócio

O agronegócio é uma atividade econômica notadamente conhecida por sua exposição ao clima. Para Ozaki (2005), as principais causas da redução da produtividade agrícola são os eventos climáticos (seca, geada, chuva excessiva, granizo e biológicos, entre outros) que podem afetar as diversas culturas em diferentes estágios de desenvolvimento. No contexto do agronegócio, existem três tipos de estratégias de gerenciamento de risco: prevenção, mitigação/ transferência e enfrentamento do risco (RAUCCI et al., 2019). Segundo Buanain e Silveira (2017), a prevenção visa reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos adversos, a mitigação busca diminuir o impacto potencial dos eventos sobre os produtores e a sociedade, e o enfrentamento objetiva aliviar os efeitos negativos provocados pela ocorrência dos eventos.

Com relação a derivativos como estratégias de mitigação no agronegócio, Buanain e Silveira (2017) apontam que a função econômica principal destes papéis é, fornecer proteção contra oscilações não favoráveis do ativo-objeto do contrato mediante operações de *hedge*, nas quais se garante a trava, no presente, da cotação de compra ou de venda para uma data futura. De forma similar, Hull (2016) aponta que estes instrumentos financeiros possam ter características específicas, sendo negociados em mercados de bolsa e de balcão.

No que concerne derivativos climáticos no agronegócio, Cao e Wei (2004); Jewson e Caballero (2003); Martin, Barnett e Coble (2001); Turvey (1999), Turvey (2001), Turvey e Kong (2010) e Zeng (2000), inicialmente empregaram relevantes esforços no desenvolvimento de uma metodologia de estimação e precificação de instrumentos de gestão de risco climático baseados em índices. Posteriormente, Alaton, Djehiche e Stillberger (2002); Stoppa e Hess

(2003) e Göncü (2011) ampliaram a agenda de pesquisa sobre derivativos climáticos, introduziram estudos aplicados concatenando métodos de estimação e precificação para culturas agrícolas selecionadas.

Tabela 3 – Resumo das principais contribuições das pesquisas sobre uso de derivativos no agronegócio

Autor	Contribuição
Dzupire, Ngare e Odongo (2019)	Os autores utilizaram um modelo de indiferença para precificar opções de <i>call</i> para o <i>hedge</i> de temperatura para produtores de Aveia no Malaui.
Ender e Zhang (2015)	Os autores estimaram parâmetros via MQO e precificaram por simulações de Monte Carlo opções de <i>call</i> para <i>hedge</i> de temperatura para cidades chinesas.
Göncü (2011)	Utilizando eversão a média e precificação com simulações de Monte Carlo, desenvolveram opções de <i>call</i> para <i>hedge</i> de temperatura (HDD e CDD) para as cidades chinesas de Beijing, Shanghai e Shenzhen.
Kermiche e Vuillermet (2016)	As autoras por meio do modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), desenvolveram uma série de opções de <i>call</i> com HDD e CDD para dezenas de países africanos e 20 culturas agrícolas diferentes.
Mushhoff, Odening e Xu (2011)	Desenvolveram opções europeias <i>call</i> e <i>put</i> para <i>hedge</i> de de pluviosidade para agricultores de trigo na região de Berlim e Tempelhof.
Raucci, Henrique e Capitani (2017)	Os autores utilizaram o modelo de Stoppa e Hess (2003) para desenvolve opções de <i>put</i> de pluviosidade para produtores de trigo em três cidades do sul do Brasil.
Špička (2011)	Desenvolveram opções de <i>call</i> e <i>put</i> para <i>hedge</i> de temperatura e pluviosidade para cidades na República Tcheca.
Sharma e Vashistha (2007)	Os autores desenvolveram opções de <i>call</i> , <i>put</i> e <i>collar</i> para <i>hedge</i> de temperatura para produtores rurais indianos.
Stoppa e Hess (2003)	Em importante estudo sobre derivativos climáticos, os autores analisaram a aplicação de opções para o <i>hedge</i> de pluviosidade para produtores rurais do Marrocos.
Turvey (2001)	Em estudo seminal, os autores analisaram a aplicação de instrumentos de gerenciamento de risco climático para o <i>hedge</i> de temperatura de milho, soja e feno para produtores rurais norte americanos.

Fonte: Elaborado pelo autor

3 METODOLOGIA

Nesta seção, apresentam-se os procedimentos metodológicos utilizados à consecução dos objetivos do presente estudo. Na seção 3.1, é apresentado a síntese do enquadramento metodológico e etapas de processo; enquanto na seção 3.2, é delineado as etapas que compreendem o desenvolvimento do protótipo e 3.3 é descrito o modelo econométrico.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Em sua forma geral, a presente dissertação propõe-se como pesquisa aplicada. Segundo Appolinário (2008) a pesquisa aplicada objetiva resolver um problema concreto e imediato da sociedade. Do ponto de vista do método, o estudo caracterizou-se como dedutivo, pois parte de um conceito geral para um específico. Para Sampieri, Callado e Lucio (2013) o processo dedutivo é caracterizado como um procedimento lógico de raciocínio, pelo qual pode-se extrair de uma ou várias proposições uma conclusão puramente lógica.

No que concerne a abordagem, o método quantitativo é empregado. Segundo Appolinário (2008), esta abordagem prevê a mensuração e avaliação de variáveis predeterminadas e a análise matemática e estatística desses dados. Devido a natureza do objeto de pesquisa, a investigação pode ser caracterizada como exploratória e descritiva. Para Creswell (2007), a abordagem exploratória permite o aprofundamento ao objeto de estudo e proporciona maior familiaridade com o problema de pesquisa objetivando a identificação de hipóteses para estudos posteriores. De outro modo, a abordagem descritiva permite a interpretação e descrição da realidade e dos resultados, sem interferência. Na tabela 4 é apresentado o resumo dos procedimentos e estratégias adotadas no processo de pesquisa.

Tabela 4 – Síntese dos tipos e enquadramentos de pesquisa

Tipo	Enquadramento	
Delineamento da pesquisa	Natureza da pesquisa	Aplicada
	Método	Dedutivo
	Abordagem	Quantitativa
	Objetivo (fins)	Exploratório e descritivo
	Estratégia	<i>Design Science Research (DSR)</i>
Análise	Técnica	Econométrica e estatística

Fonte: Elaborado pelo autor

A operacionalização da pesquisa implica no desenvolvimento de uma prova de conceito. Para viabilizar a construção do protótipo, é necessário combinar a técnica econométrica e estatística para estimação dos parâmetros e precificação dos contratos de derivativos climá-

ticos com a metodologia *Design Science Research* (DSR). Para Dresch, Lacerda e Antunes (2015), Hevner e Chatterjee (2010), Vaishnavi e Kuechler (2015), com base no entendimento do problema, este método pode ser usado para construir e avaliar artefatos que possibilitam a transformação de situações para estados melhores e a resolução de problemas práticos. Para Dresch, Lacerda e Antunes (2015), uma característica fundamental da pesquisa DSR é sua orientação à solução de problemas específicos, não necessariamente a busca por a solução ótima, mas sim, uma solução satisfatória para a situação. Nesta direção, Hevner e Chatterjee (2010), Vaishnavi e Kuechler (2015), apontam que as soluções geradas pela pesquisa conduzida pela DSR devem ser passíveis de generalização para uma determinada classe de problemas, permite assim que outros pesquisadores e profissionais, em situações diversas, também possam fazer uso do conhecimento gerado. Em adição, Dresch, Lacerda e Antunes (2015) sugerem que a pesquisa fundamentada na metodologia DSR pode ocorrer tanto no âmbito acadêmico, quanto organizacional.

Neste contexto, Dresch, Lacerda e Antunes (2015), Hevner e Chatterjee (2010), Vaishnavi e Kuechler (2015) sugerem que a construção de artefatos poderia ser usada por diferentes abordagens, como algoritmos computacionais, representações gráficas, protótipos e modelos em escala, entre outros. Para o desenvolvimento do artefato proposto, será adotado o roteiro adaptado de Hevner e Chatterjee (2010).

Tabela 5 – Critérios e descrição para DSR

Diretriz	Descrição
Diretriz 1: Projeto do artefato	Avaliação de uma prova de conceito operacionalizada por um protótipo de sistema baseado em <i>blockchain</i> .
Diretriz 2: Relevância do problema	O clima constitui uma relevante fonte de risco para diversos setores da economia, entre os particularmente expostos estão os produtores rurais. O protótipo objetiva ofertar uma plataforma autônoma para negociação de derivativos climáticos baseados em tecnologia <i>blockchain</i> .
Diretriz 3: Avaliação do projeto	Avaliação da viabilidade econômica e financeira dos contratos de derivativos e da plataforma <i>blockchain</i> . Testes de funcionalidade para avaliar e demonstrar a utilidade da solução prototipada.
Diretriz 4: Contribuição da pesquisa	Entre as contribuições esperadas estão: ofertar uma opção de acessível economicamente para agricultores mitigarem seu risco climático, demonstrar a viabilidade de derivativos climáticos, desenvolver uma modelo passo a passo para criação de plataformas simples para produtos financeiros em <i>blockchain</i> .
Diretriz 5: Rigor da pesquisa	Seguindo as diretrizes propostas por Hevner e Chatterjee (2010). Disponibilização do repositório com todos os códigos e algoritmos utilizados.
Diretriz 6: Projeto como um processo de pesquisa	A pesquisa concatena dois temas distintos: <i>blockchain</i> e derivativos climáticos. O projeto foi fundamentado nas proposições pioneiras de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), Nakamoto (2008). Em adição, estudos com aplicações similares foram avaliados.
Diretriz 7: Comunicação dos resultados	O presente estudo disponibilizará: os algoritmos de estimação e precificação, o código de programação, a lógica de implantação e descrição de suas características de modo que o experimento possa ser reproduzido por outro pesquisador. Em adição, será apresentado no texto a avaliação e resultados encontrados.

Fonte: Elaborado a partir de Hevner e Chatterjee (2010)

A operacionalização da pesquisa pode ser compreendida em uma sequência de etapas. Primeiramente, o modelo estatístico para estimação e precificação dos derivativos climáticos é detalhado. Posteriormente, são descritos a avaliação de viabilidade e os aspectos técnicos mais relevantes, dos quais envolvem o desenvolvimento do artefato (plataforma) de negociação dos derivativos climáticos, baseada em ambiente *blockchain*.

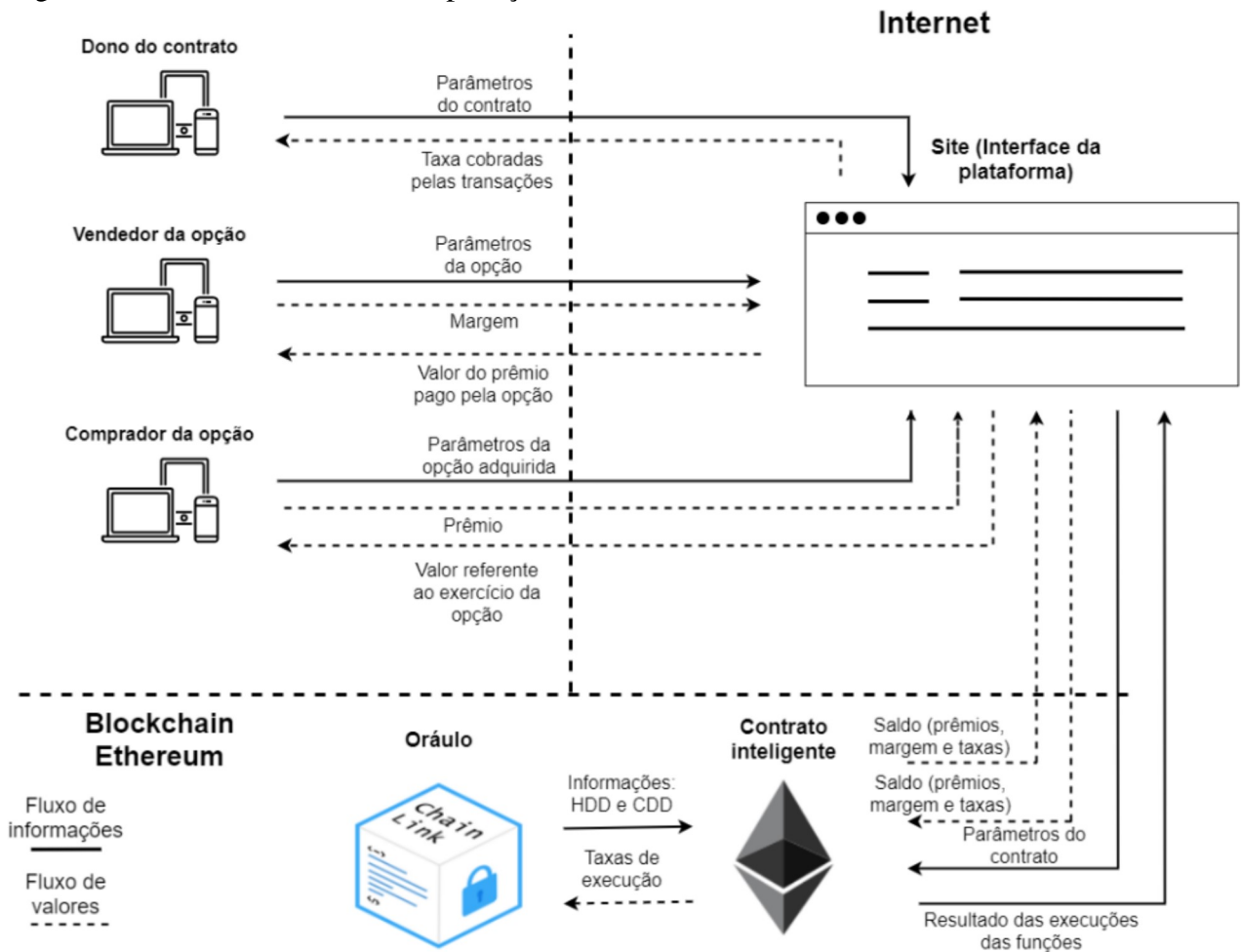
3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO NO *BLOCKCHAIN*

A aplicação da abordagem DSR na pesquisa envolve um conjunto de etapas predefinidas. Para Dresch, Lacerda e Antunes (2015), as etapas podem ser sistematizadas em: construir um *framework* conceitual, desenvolver uma arquitetura de sistema, analisar e projetar o sistema, construir o protótipo de sistema e observar e avaliar a eficiência do sistema desenvolvido. Neste sentido, entre as estratégias mais adequadas ao desenvolvimento de aplicações *blockchain* disponíveis no arcabouço DSR estão a *Case-Based Database Design Support System*, sistema de suporte de design de banco de dados baseado em casos (tradução nossa), e a *Automating the Discovery of AS-IS Business Process Models: Probabilistic and Algorithmic Approaches*, automatização de descoberta de modelos de processos de negócios AS-IS: abordagens probabilísticas e algorítmicas (tradução nossa).

Segundo Vaishnavi e Kuechler (2015), a *Case-Based Database Design Support System* aborda o desenvolvimento de técnicas e ferramentas automatizadas para o projeto conceitual de banco de dados e a *Automating the Discovery of AS-IS Business Process Models* desenvolve estratégias para extração sistemática e automática de modelos de processos de negócios AS-IS (atual e hipotético). Em síntese, estas técnicas permitem tanto o desenvolvimento e avaliação de um protótipo real de um sistema ou aplicativo, quanto a descrição de um modelo de negócios.

Em uma visão geral, o protótipo de plataforma *blockchain* envolve duas partes distintas. O *backend* é constituído pelo contrato inteligente baseado no *blockchain Ethereum*, enquanto o *frondend* é formado por um *website* hospedado e disponível para acesso livre na internet, constitui uma interface de uso que permite a interação com os usuários e apresentação do modelo de negócio. Para construção do *Fronndend* foi utilizado como base o *framework* em linguagem *javascript React*. Para o *backend* foi utilizado juntamente com o contrato inteligente em linguagem *solidity* o *framework truffle* baseado em *Nodejs* conjuntamente com a biblioteca *javascript web3js*.

Figura 8 – Fluxo de atividades da aplicação



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 6 apresenta a simplificação dos processos de interação entre os usuários e o protótipo. Os usuários da plataforma podem ser divididos em três grupos. O primeiro, constitui a figura do dono do contrato responsável pelo *deploy* do contrato, disponibilização de saldo para execução das solicitações¹ do oráculo e da definição das regras do Dapp. Paralelamente, os vendedores das opções disponibilizam contratos para venda, seguindo as especificações da plataforma e precificação sugerida pela metodologia apresentada na sessão anterior. Para garantir a liquidez e segurança na cobertura de todas as posições, a plataforma exige no ato da disponibilização do contrato o valor integral da margem para cobertura da opção (*tick* vezes o *limit*). Por outro lado, a figura do comprador da opção verifica as opções disponíveis e realiza ou não a aquisição da mesma, transfere juntamente com os dados o valor referente ao prêmio da opção. Em adição, para garantir a viabilidade econômica da plataforma, foi delimitado no

¹ Vale ressaltar que todas as transações junto a qualquer contrato junto ao *blockchain Ethereum* exige o pagamento de taxas denominadas *gas*. Bambara e Allen (2018) define essa taxa como um valor cobrado cada vez que uma transação ou contrato inteligente são executados, isto por sua vez remunera o esforço computacional despendido na execução das funções e manutenção da rede.

código a cobrança de 1% sobre o valor das transações.

A interação completa com a plataforma não exige cadastro ou disponibilização de informações adicionais, apenas a utilização de uma carteira de criptomoedas MetaMask² que realiza a intermediação e troca dos recursos. Deste modo, a plataforma recebe as solicitações e execuções no *frondend* e repassa para o contrato inteligente no *backend*, que por sua vez processa de forma autônoma as funções. Pontualmente, quando executado o exercício das opções, o contrato inteligente solicitada para o oráculo *Chainlink* a verificação da temperatura acumulada. O oráculo dispara o uso de uma *Application Programming Interface* (API), interface de programação de aplicações, solicita informações junto ao website que reúne informações climáticas e envia estas informações externas para "dentro" do *blockchain*. As principais funções do contrato inteligente estão sistematizadas na tabela 7.

Vale ressaltar, outras funções de uso interno do contrato, conjuntamente com a função construtora e com outros objetos são omitidos do detalhamento, devido a inexistência de um retorno de informações para o *frondend*. Entretanto, toda a documentação bem como os códigos e algoritmos estão disponíveis em <https://github.com/FernandoAlvesSilveira/wdc>.

² Disponível em <https://metamask.io/>

Tabela 6 – Síntese das funções do contrato inteligente

Função	Finalidade	Especificação
<i>submitOption</i>	Recebe os dados (<i>maturity, strike, payoff, limit, location, tick, id</i>) via formulário no padrão do <i>struct Option</i> injetando no objeto <i>mapping OptionList</i> .	Função pública do tipo <i>payable</i>
<i>submitOrder</i>	Recebe o dado (id) via formulário, localiza as informações no <i>OptionList</i> , injeta as informações do <i>struct Order</i> no <i>mapping OrderList</i> e exclui o <i>struct Option</i> do <i>mapping OptionList</i> .	Função pública do tipo <i>payable</i>
<i>exerciseOption</i>	Recebe o dado (id) via formulário, localiza as informações no <i>OrderList</i> , e verifica as condições de <i>strike</i> junto ao objeto do Oráculo correspondente. Ao final realiza o cálculo e transferência dos respectivos valores e exclusão do <i>struct Order</i> do <i>mapping OrderList</i> .	Função pública do tipo <i>payable</i>
<i>getOptionDetails</i>	Recebe o dado (id) e retorna a <i>struct Option</i> do <i>mapping OptionList</i> .	Função pública do tipo <i>view</i>
<i>getOrderDetails</i>	Recebe o dado (id) e retorna a <i>struct Order</i> do <i>mapping OrderList</i> .	Função pública do tipo <i>view</i>
<i>requestJataiDD</i>	Requisita ao oráculo Chainlink disparando uma solicitação no link fornecido retornando o valor correspondente (cidade de Jataí para o período solicitado).	Função pública do tipo <i>payable</i>
<i>requestIratiDD</i>	Requisita ao oráculo Chainlink disparando uma solicitação no link fornecido retornando o valor correspondente (cidade de Irati para o período solicitado).	Função pública do tipo <i>payable</i>
<i>requestRioVerdeDD</i>	Requisita ao oráculo Chainlink disparando uma solicitação no link fornecido retornando o valor correspondente (cidade de Rio Verde para o período solicitado).	Função pública do tipo <i>payable</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

No que concerne o contrato inteligente³ os testes foram realizados primeiramente com o *framework ganache*⁴ que simula um *blockchain* em rede local e posteriormente foram

³ 0x585B284a6ff3c695dceb0b28332a0039399ef86b

⁴ No Ethereum, além da rede original *mainnet*, existem outras redes para realização de testes, entre as mais utilizadas estão a *Ropsten*, *Kovan* e *Rinkeby*. Segundo Bambara e Allen (2018) o objetivo das redes de teste é simular o contrato em um ambiente similar ao disponível na *mainnet*, utilizando o *ether* nas transações sem qualquer custo.

utilizados em um ambiente de teste *Ropsten* e *Kovan* antes da disponibilização do contrato na *mainet*.

3.3 MODELO, PARÂMETROS E PRECIFICAÇÃO

A construção de um derivativo climático envolve três etapas: elaboração do desenho do contrato; levantamento e estimação cuidadosa dos parâmetros do índice subjacente; precificação justa dos contratos (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Devido à natureza incomum do emprego de índices climáticos como parâmetros de instrumentos financeiros de proteção, diversas estratégias desenvolvidas podem ser encontradas na literatura. Entre estes modelos, o modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) é amplamente adotado (com e sem modificações).

A estratégia de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) envolve a estimação de uma função senoidal, parâmetros de tendência, estimador de velocidade de reversão á media e volatilidade. A função senoidal assume a forma $\text{seno}(\omega t + \phi)$. Onde $t = 1, 2 \dots$ indicando o período. Tem-se então $\omega = 2\pi/365$. Em adição, Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) utilizam um parâmetro ϕ para indicar o ângulo de início de inclinação da função senoidal. De forma geral, o modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) para parâmetros de reversão pode ser descrita na equação a seguir:

$$T_t^m = A + B_t + C \text{seno}(\omega t + \phi) \quad (3.1)$$

Os parâmetros A, B, C e ϕ estimados via regressão dos mínimos múltiplos quadrados (MQO), projeta a posição de cada variável (temperatura) futura. Diferentemente da estratégia sugerida por Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), este estudo utilizara um componente de variação quadrática único anualizado σ_t . A parte estocástica do modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) assume a forma de $\sigma_t W_t$, $t > 0$, onde W_t indica um movimento Browniano. A forma geral, pode ser observada na equação estocástica diferencial (SDE) a seguir:

$$dT_t = \alpha(T_t^m - T_t)dt + \sigma_t dW_t \quad (3.2)$$

Nesta direção, a estratégia de reversão de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) assume a forma de processo estocástico de Ornstein-Uhlenbeck (OU). Conforme Zapranis e Alexandridis (2013), o processo de OU assume necessariamente a forma estacionária, Gaussiana e Markoviana, sendo necessário de satisfazer estas condições. Segundo Zapranis e Alexandridis

(2013), o processo OU que satisfaz a equação estocástica diferencial pode ser descrito como a equação a seguir:

$$dX_t = \alpha(\mu - X_t)dt + \alpha dW_t \quad (3.3)$$

Onde W_t indica o movimento Browniano. Os parâmetros assumidos como constantes são:

- $\alpha > 0$, é a taxa de reversão á media.
- μ é um parâmetro de média de longo prazo
- $\sigma > 0$, é a taxa de volatilidade da variável

Entretanto, segundo Kordi (2012) é necessário um ajuste de *drift* para que o processo OU possa reverter os valores a sua média no longo prazo. Por isso, Jewson e Brix (2005), Kordi (2012) indicam que o modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) assuma a forma da equação a seguir:

$$\frac{dT_t^m}{dT} = B + \omega C \coseno(\omega t + \phi) \quad (3.4)$$

Segundo Dornier e Querel (2000), este *drift* ira reverter o processo OU no longo prazo. Nesta direção, o modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) parte do período T_s pode ser estimado pela equação a seguir:

$$dT_t = \left[\frac{dT_t^m}{dT} + \alpha(T_t^m - T_t) \right] dt + \sigma_t dW_t, t > s \quad (3.5)$$

Jewson e Brix (2005), Kordi (2012), Zapranis e Alexandridis (2013) apontam que para solucionar a equação derivada do modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) é necessário a aplicação do Lema de Itô. Kordi (2012) descreve o procedimento como uma regra, usada para o cálculo da dinâmica de uma função dependente do tempo de um processo estocástico (como o Movimento Browniano Geométrico (GBM)) $x(t)$ que tem forma $x_t \alpha(x_t, t)dt + b(x_t, t)dz_t$. Consequentemente, se $F(x, t)$ é uma função duas vezes diferenciável, então a dinâmica do processo estocástico $F(x_t, t)$ pode ser descrita como:

$$dF(x, t) = \left[\alpha(x_t, t) \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{2} b^2(x_t, t) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right] dt + \left[(b(x_t, t)) \frac{\partial F}{\partial x} \right] dz_t \quad (3.6)$$

Seguindo Kordi (2012) aplica-se o Lema de Itô para $f(T_t, t) = e^{\alpha, t} T_t$:

$$\frac{\partial f}{\partial T} = e^{\alpha, t}, \frac{\partial f}{\partial t} = \alpha T_t^{\alpha, t}, \frac{\partial^2 f}{\partial T^2} = 0 \quad (3.7)$$

E tem-se então a dinâmica de $f(T_t, t)$ a seguir:

$$df(T_t, t) = \left[e^{\alpha, t} \frac{dT_t^m}{dt} + \alpha e^{\alpha, t} T_t^m \right] dt + \sigma_t e^{\alpha, t} dW_t \quad (3.8)$$

De acordo com Kordi (2012), integra-se o ponto de partida s a t , obtemos:

$$df(T_t, t) = \left[e^{\alpha, t} \frac{dT_t^m}{dt} + \alpha e^{\alpha, t} T_t^m \right] dt + \sigma_t e^{\alpha, t} dW_t \quad (3.9)$$

Agora, integrando do ponto de partida s ao t , obtemos:

$$f(T_t, t) - f(T_s, s) = \int_s^t e^{\alpha, \tau} \frac{dT_\tau^m}{d\tau} + \int_s^t \alpha e^{\alpha, \tau} T_\tau^m d\tau + \int_s^t \sigma_\tau e^{\alpha, \tau} dW_\tau \quad (3.10)$$

$$= [e^{\alpha, \tau} T_\tau^m]_s^t - \int_s^t \alpha e^{\alpha, \tau} T_\tau^m d\tau + \int_s^t \alpha e^{\alpha, \tau} T_\tau^m d\tau + \int_s^t \sigma_\tau e^{\alpha, \tau} dW_\tau \quad (3.11)$$

$$= e^{\alpha, t} T_t^m - e^{\alpha, s} T_s^m + \int_s^t \sigma_\tau e^{\alpha, \tau} dW_\tau \quad (3.12)$$

De acordo com Kordi (2012), pode-se obter também:

$$T_t e^{\alpha, t} = e^{\alpha, t} T_s + e^{\alpha, t} T_t^m - e^{\alpha, s} T_s^m + \int_s^t \sigma_\tau e^{\alpha, \tau} dW_\tau \quad (3.13)$$

Portanto, segundo Kordi (2012), a solução é:

$$T_t = (x - T_s^m) e^{-\alpha(t-s)} + T_s^m + \int_s^t e^{-\alpha(t-\tau)} \sigma_\tau dW_\tau \quad (3.14)$$

Em que:

$$T_t^m = A + Bt + C \text{seno}(\omega t + \phi) \quad (3.15)$$

Conforme discutido por Jewson e Brix (2005), Zapranis e Alexandridis (2013), no que concerne a precificação de derivativos climáticos, as simulações de Monte Carlo são apon-

tadas como estratégias adequadas em detrimento do tradicional modelo Black e Scholes (1973). Nesta direção, o *payoff* de uma equação de *call* pode ser encontrada a partir da equação a seguir:

$$Payoff = \max(I_n^H - K, 0) \quad (3.16)$$

Em que:

$$I_n^H = \sum_{i=1}^n \max[22 - T_i, 0] \quad (3.17)$$

Para simplicidade na descrição, assume-se como temperatura padrão 22 graus celsius e um valor de *tick* = 1. Para determinar os valores do *payoff* descritos nas equações previamente apresentadas, é necessário um processo subjacente. Nesta direção, Kordi (2012) implica uma aproximação onde, T_i , $i = 1, \dots, n$ são todas amostras de um processo OU, que é um processo Gaussiano. Isso significa que o vetor (T_1, T_2, \dots, T_n) é gaussiano. Segundo Kordi (2012), a soma é uma combinação linear dos elementos neste vetor, I_n^H também é Gaussiana. Com esta nova estrutura de I_n^H calcula-se o primeiro e o segundo momentos. Tem-se então, $t < t_1$ em que:

$$\mathbb{E}^Q[I_n^H | F_t] = \mathbb{E}^Q[22n - \sum_{i=1}^n T_{ti} | F_t] \quad (3.18)$$

$$= 22n - \sum_{i=1}^n \mathbb{E}^Q(T_{ti}, i | F_t) \quad (3.19)$$

De acordo com Kordi (2012), conseqüentemente tem-se:

$$Var[I_n^H | F_t] = \sum_{i=1}^n Var[T_{ti}, i | F_t] + 2 \sum_{i < j} Cov[T_{ti}, T_{tj} | F_t] \quad (3.20)$$

Seguindo o procedimento de Kordi (2012), para o modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) encontra-se $\mathbb{E}^Q[I_n^H | F_t] = \mu_n$ e $Var[I_n^H | F_t] = \sigma_n^2$. Portanto, I_n^H é $N(\mu_n, \sigma_n^2)$ distribuído. A partir disto, o preço em $t \leq t_1$ da opção de *call* de HDD com pagamento é dado por:

$$call(t) = e^{-r(t_n-t)} \mathbb{E}^Q[\max[I_n^H - K, 0] | F_t] \quad (3.21)$$

$$= e^{-r(t_n-t)} \int_K^\infty (x - K) f_{I_n^H}(x) dx \quad (3.22)$$

$$= e^{-r(t_n-t)} \left[(\mu_n - K)\Phi(\alpha_n) + \frac{\alpha_n}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\alpha_n^2}{2}} \right] \quad (3.23)$$

A partir destas equações e parâmetros, as simulações de Monte Carlo são efetuadas, estima-se o respectivo *payoff* do derivativo para cada simulação, assume-se o valor médio destas simulações como o prêmio justo do contrato. O algoritmo para estimação e precificação foi escrito na linguagem R disponível no Apêndice B.

3.3.1 Dados do estudo

Para aplicação do modelo selecionado e execução da pesquisa, foram selecionadas três localidades brasileiras que reuniam expressiva relevância na produção *commodities* agrícolas, com a presença de estações meteorológicas ativas.

Tabela 7 – Localidades selecionadas

Localidade	Estação	<i>Commodities</i>
Jataí - GO	Cód 83464 (Lat: -17.9236, Lon: -51.7174)	Milho e Soja
Irati - PR	Cód 83836 (Lat: -25.5028, Lon: 50.6376)	Feijão e Milho
Rio Verde - GO	Cód 83470 (Lat: -17.7852, Lon: 50.9647)	Soja

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados de temperatura máxima e mínima diária foram obtidos junto ao Banco de Dados Meteorológicos para o Ensino e Pesquisa (BDMEP) disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O período selecionado compreende 01/01/1990 até 31/12/2020, o que constitui um período de 30 anos. Para a Organização Mundial do Clima (WMO, 2020), o período de 30 anos compreende quantidades relevantes de informações para realizar inferências sobre o comportamento do clima.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas

Statistic	N	Mean	St. Dev.	Min	Pctl(25)	Pctl(75)	Max
Jataí - GO	10,722	23.994	2.642	8.400	22.400	25.850	31.100
Irati - PR	10,552	18.533	4.117	2.450	15.850	21.850	27.100
Rio Verde - GO	7,550	24.008	2.383	11.700	22.700	25.500	31.700

Fonte: Elaborado pelo autor

Devido a existência de observações ausentes nas séries observadas, foi estabelecido um recorte mínimo de 20 anos ou 7300 observações. Em adição, segundo o modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) é necessário observar o ano bissexto e extrair das séries o vigésimo nono dia do mês de fevereiro. Vale ressaltar que, a negociação de qualquer produto de derivativo climático deve observar a efetividade dos dados climáticos e em relação a localidade observada,

denominado de risco de base. Para Jewson e Brix (2005), Zapranis e Alexandridis (2013) o risco de base é resultado da correlação imperfeita entre o *payoff* pago pelo derivativo e o *payoff* ideal para o *hedge* do comprador. De forma similar, o risco de base geográfico pode ser definido como a diferença entre o *payoff* do recebido pelo comprador e o prejuízo resultado da exposição, justificada pela diferença de localização entre o local a ser protegido e o local onde está realmente instalada a base de aferição do índice de indexação do contrato (LOPES, 2018). Entretanto, não existe consenso na literatura sobre de uma distância limite para mitigar o risco de base geográfico. Por conveniência, o presente estudo assume uma distância de 100km da estação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo descreve e apresenta os resultados obtidos na pesquisa, tem por objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica de aplicação da tecnologia *blockchain* como plataforma para negociação de derivativos climáticos. A apresentação dos resultados do estudo foram organizados em três seções, conforme os objetivos específicos delimitados na pesquisa.

Inicialmente, é detalhado os aspectos mais relevantes do desenvolvimento de uma plataforma de negociação de derivativos, baseados em tecnologia *blockchain*. Posteriormente, é apresentado a precificação dos contratos de derivativos calculados para as localidades selecionadas. Finalmente, são analisados a viabilidade técnica, econômico-financeira e legal das soluções apontadas.

4.1 UMA PLATAFORMA BASEADA NO *BLOCKCHAIN*

O desenvolvimento de um protótipo funcional baseado em tecnologia *blockchain* objetiva oferecer um entendimento sobre a viabilidade de implementação de uma plataforma de negociação de derivativos climáticos, em ambiente de registro distribuído e prover um modelo base para o desenvolvimento de outras aplicações. Neste contexto, a opção pelo desenvolvimento de um modelo em *blockchain* público (*permissionless*) *Ethereum* deu-se pela: oferta de documentação da linguagem *solidity*, baixos custos de implementação e comunidade ativa de usuários.

O protótipo desenvolvido é constituído de duas partes principais. o *backend* é formado por um conjunto de arquivos baseados em diferentes linguagens de programação (*javascript*, *json*, *python*). O contrato inteligente é baseado em linguagem *solidity* e responsável pela implementação das regras de negócio predefinidas em funções algorítmicas operacionalizáveis de forma autônoma na rede *blockchain Ethereum*. Em adição, este mecanismo de contratos inteligentes suporta a implementação de organizações autônomas descentralizadas (DAO). A execução de funções em *blockchain* público como o *Ethereum*, incorrem em custos de operação denominados *gas* que remuneram o esforço computacional despendido na manutenção da rede (BAMBARA; ALLEN, 2018; MOUGAYAR, 2016; SWAN, 2015). Cada contrato possui um custo operacional distinto e relativo ao tamanho e complexidade do algoritmo. Os custos estimados para execução das principais funções do protótipo desenvolvido estão resumidas na tabela 9.

Tabela 9 – Síntese dos custos de *gas* do contrato

Atividade	Responsável	Custo em Eth	Custo em R\$
Deploy do contrato	Dono do contrato	0.11218	1088,04
Submissão da opção	Lançador da opção	0.01300	126,08
Aquisição da opção	Comprador da opção	0.01300	126,08
Consultado ao oráculo	Compradores e vendedores	0.00063	5,82
Exercício da opção	Compradores e vendedores	0.01300	126,08

Fonte: Elaborado pelo autor

Diferentemente das outras funções, os valores de consulta ao oráculo não necessitam de chamadas recorrentes. Os valores ficam disponíveis para a requisição do exercício de diversas opções. Em adição, por questões de segurança o contrato não executa o exercício da função se o oráculo não é requisitado, retorna os valores para as respectivas partes da opção.

Neste contexto, um produto produto de balcão típico pode ser caracterizado como um contrato a termo ou de opção que oferece um resultado dependente do HDD ou CDD acumulado durante o período determinado. A exemplo, um corretor poderia, por meio de sua *wallet*, em fevereiro de 2021, disponibilizar uma opção de compra sobre o HDD acumulado durante o mês de fevereiro de 2021 na estação meteorológica Iratí - PR com prêmio de 0,082 Eth, *strike* fixado em 150 graus dia e taxa de pagamento de 0,0010 Eth por grau dia, limitado a 450 graus dia acumulado. Em outro lado, um produtor rural que deseja proteger-se de uma variação na sua produtividade advinda do excesso de calor, por meio de sua *wallet*, adquirir a opção ofertada. No vencimento da opção, se o HDD acumulado real for de 350 graus dia, o resultado é um pagamento de 200 graus dia (350 menos o limite) vezes o valor de *tick* acordado, ou seja 0,0200 Eth para o detentor da opção (produtor rural), valor sendo disponibilizado em sua *wallet*. Segundo Hull (2016), na existência de um limite de pagamento, o contrato assume a forma equivalente a um *spread* de alta.

O contrato inteligente pode ser encontrado no apêndice A e o conjunto total dos arquivos pode ser encontrado no repositório <https://github.com/FernandoAlvesSilveira/wdc>. A outra parte do protótipo constitui-se do *frontend* formado por uma *web application* baseada no *framework react* e em outras linguagens de programação (*javascript*, *json*, *html* e *css*). Esta interface para interação com os usuários é hospedada em www.weatherderivativeschain.com. A figura 8 apresenta a página de negociação (www.weatherderivativeschain.com/plataform).

Figura 9 – Plataforma de negociação

WDC

Home Features Contact FAQ

Contratos listados

ID	Maturity	Strike	Payoff	Limit	Location	Tick	Launcher
1	1618264732	150	8200000000000000	650	1	1000000000000000	0xd643Bb3A
3	1618264732	250	1400000000000000	750	2	1000000000000000	0xd643Bb3A
4	1618264732	150	1400000000000000	650	1	1000000000000000	0xd643Bb3A

Contratos negociados

ID	Holder	Maturity	Strike	Payoff	Limit	Location	Tick	Launcher
----	--------	----------	--------	--------	-------	----------	------	----------

Liquidez da Plataforma

Eth 2.735282

Ofertar opção

Maturity:

Strike:

Payoff:

Limit:

Location:

Ticket:

Adquirir contrato

Option ID:

Exercer Opção

Order ID:

Jatai Oráculo

HDD acumulado: 80

Irati Oráculo

HDD acumulado: 0

Rio Verde Oráculo

HDD acumulado: 0

Home Features Terms About

Twitter Facebook Instagram Pinterest Google+

Fonte: Extraído de www.weatherderivativeschain.com/plataform

A página de interação apresenta duas na parte esquerda. Estas listas retornam os "Contratos listados" disponíveis para aquisição e "Contratos negociados" que aguardam o exercício. Em ambas as listas as chaves públicas são retornadas. Na parte direita superior um *card* retorna o saldo total do contrato. Nos *cards* inferiores estão dispostos formulários para ofertar, adquirir e exercer as opções. Na parte inferior estão os *cards* para requisição e retorno dos valores do oráculo para cada localidade.

A interação com a plataforma via endereço eletrônico depende da utilização da car-

teira de criptomoedas MetaMask, entretanto a interação ainda pode ser realizada diretamente via *hash*¹ do contrato. O tempo observado da execução das funções ficou em média abaixo de 10 segundos, consideravelmente menor quando comparado ao *blockchain* do *bitcoin*. O padrão geral e os códigos utilizados na construção do protótipo pode ser reutilizado com alteração e ajustes no *blockchain Ethereum*, ou empregar em paralelo um contrato de *token* padrão ERC20, evitando a exposição á volatilidade da cotação de criptomoeda com o uso de uma "moeda" alternativa, pode ser conectada com um sistema de pagamento preexistente. De forma similar, há possibilidade de empregar outra arquitetura como o *framework hyperledger* para desenvolver outras funcionalidades.

4.2 A PRECIFICAÇÃO ESTIMADA DOS DERIVATIVOS PARA AS CIDADES SELECIONADAS

No contexto do agronegócio, os derivativos climáticos objetivam oferecer uma proteção financeira contra condições meteorológicas adversas não catastróficas (JEWSON; BRIX, 2005; ZAPRANIS; ALEXANDRIDIS, 2013). Neste sentido, o *hedge* oferecido objetiva proteger a renda dos produtores rurais contra a redução de produtividade devido a períodos com calor acima da média histórica. Segundo relatório da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2020), a exposição da soja a temperaturas muito elevadas do ar (>30 C°) afetam o desenvolvimento normal da planta diminuindo o crescimento e consequentemente a produtividade da lavoura. Em adição, o estresse térmico quando associado a períodos de déficit hídrico pode resultar em um fenômeno denominado tombamento fisiológico, onde ocorre a desestruturação dos tecidos da planta e consequente perda da lavoura (EMBRAPA, 2020).

Seguindo o modelo pioneiro de precificação de derivativos climáticos desenvolvido por Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), foram estimados os parâmetros necessários para precificação posterior. Conforme o trabalho de Kordi (2012), foram encontrados os valores para os parâmetros: A, B, C, ϕ , σ , α . Devido a função senoidal os valores de ω do modelo são padronizados em $2\pi/365$. A tabela 9 apresenta um resumo dos parâmetros estimados.

Tabela 10 – Parâmetros de estimação

Cidade	To	A	B	C	ϕ	σ	α
Jatai - GO	23.994	25.001	-0.0052	2.7493	-3.6076	2.0554	0.11837
Irati - PR	18.533	17.527	0.00562	3.2245	-2.7848	4.3415	0.13693
Rio Verde - PR	24.008	23.970	0.0002	1.2918	-4.3565	2.2021	0.11284

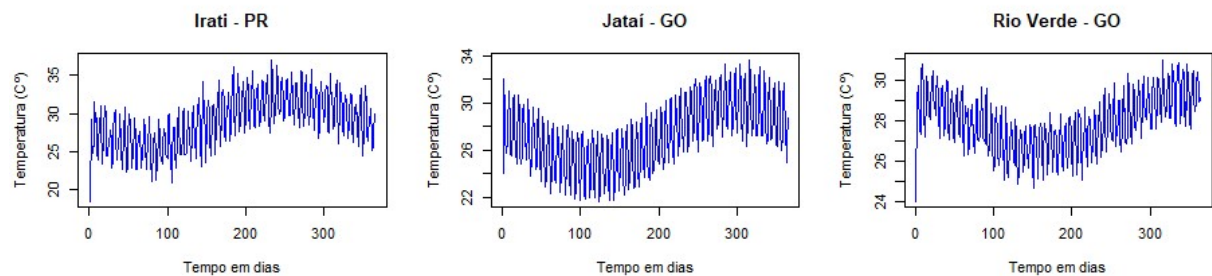
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da pesquisa

¹ 0x585B284a6ff3c695dceb0b28332a0039399ef86b

Alaton, Djehiche e Stillberger (2002), Kordi (2012) utilizam um parâmetro predefinido $\lambda = 0.08$ que mostra-se incompatível com séries históricas dos dados de cidades brasileiras. Em diversas simulações, observou-se que o parâmetro $\lambda = -3$ é mais adequado e reproduz simulações de trajetórias de temperatura mais adequadas. Supõe-se que a diferença do comportamento das variáveis no modelo é devido à diferença na proporção entre dias quentes e frios das cidades observadas

Para o modelo foram simulados trajetórias de temperaturas médias para um período de 365 dias. Entretanto, as opções de *call* para HDD estimadas cobrem um período de 59 dias. A figura 9 apresenta as trajetórias simuladas pelo algoritmo.

Figura 10 – Trajetórias simuladas



Fonte: Elaborado pelo autor

A precificação observou os parâmetros estimados em um conjunto de 1000 simulações de Monte Carlo, onde foram calculados os valores justos dos prêmios dos derivativos do tipo *call* HDD para as cidades selecionadas. As opções estimadas possuem maturidade de 59 dias, com uma taxa livre de risco de 5%. O HDD é acumulado quando a temperatura média observada no dia for superior a temperatura média histórica (T_0). Quando o valor de HDD acumulado superar o valor de *strike* definido é disparado a condição de pagamento com o valor do grau acumulado vezes o valor do *tick*. A tabela 11 apresenta o resumo dos resultados calculados.

Tabela 11 – Prêmio médio estimado

Localidade	Commoditie	Strike	Limit	Tick	Taxa livre de risco	Prêmio
Jataí - GO	Milho	150	450	0,0010	5.00%	0,0082
Irati - PR	Feijão	250	550	0,0010	5.00%	0,014
Rio Verde - GO	Soja	300	600	0,0010	5.00%	0,017

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da pesquisa

Os valores estão calculados em unidades monetárias genéricas e expressos em *Ether*. Paralelamente, os valores limites de cobertura seguem o padrão de *strike* acrescidos de 300 graus acumulados. Vale ressaltar, a precificação baseia-se em uma média objetiva cobrir dife-

rentes fases de plantio. Entretanto, mesmo quando convertidos² em reais os valores dos prêmios estimados ficam abaixo de R\$ 100,00 para uma cobertura mínima de até 300 vezes o valor do *tick*.

De forma geral, o funcionamento de um derivativo climático com limite de pagamento para *hedge* de temperatura ou pluviosidade tem seu funcionamento análogo ao seguro paramétrico (JEWSON; BRIX, 2005). Deste modo, a contratação do derivativo pelo produtor rural tem o potencial de ajustar a receita ao longo do tempo, permite uma melhor previsibilidade do retorno do investimento realizado, mesmo em situações de aumento expressivo de temperatura. Por conseguinte, segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2020) mesmo com o aumento dos limites das subvenções federais, apenas 20% da área total plantada no Brasil possui alguma modalidade de seguro rural.

Todavia, diferentemente do seguro rural, as opções de derivativos podem oferecer limites maiores. Neste sentido, seguros rurais estão comumente vinculados a comprovação da perda, enquanto derivativos são flexíveis, não possuindo vínculo com o produto ou área específica. Para Manfredo e Richards (2009), seguros estão sujeitos a critérios subjetivos, problemas de *moral hazard* e seleção adversa, de forma que derivativos climáticos fundados em critérios objetivos podem ser preferíveis. Em mesma medida, embora seguros rurais possuam subvenções federais, as coberturas de seguro rural estão geralmente associadas a algum tipo de financiamento rural o que pode limitar o acesso a este tipo de instrumento de proteção. Paralelamente, contratos de derivativos negociados no mercado de balcão (OTC) oferece maior flexibilidade em sua estruturação e não está sujeito as regulações da Superintendência de Seguros Privados (SUSEP) e a incidência de imposto sobre operações financeiras (IOF). Nesta direção, a disponibilização de derivativos climáticos pode oferecer uma alternativa economicamente viável e flexível para o gerenciamento desta fonte de risco.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E LEGAL DAS SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS

Os aspectos técnicos observados no desenvolvimento de uma aplicação baseada em tecnologia *blockchain* envolvem primeiramente, observar a real necessidade de se garantir o estado da informação. Mougayar (2016), Tapscott e Tapscott (2018) sinalizam que, a viabilidade na aplicação do *blockchain* nos negócios está diretamente ligada com a necessidade de garantir o estado da informação. Neste sentido, o protótipo objetivou automatizar o registro e

² Valores de referência 1 Ether = R\$ 8.825,60, extraído em 02 de fevereiro de 2021.

compensação de instrumentos de gerenciamento de risco climático em um ambiente simples, transparente e de baixos custos.

O protótipo desenvolvido no *blockchain Ethereum* atendeu as necessidades do registro, alteração e exclusão de informações no contrato de forma satisfatória. Paralelamente, o funcionamento do Oráculo na consulta a informações externas deu-se de forma adequada e permitiu a execução completa das funções. Entretanto, a utilização do *blockchain Ethereum* possui limitações relevantes quanto ao tamanho e complexidade do contrato. Em adição, desenvolver instrumentos financeiros baseados em criptomoedas pode incorrer na volatilidade dos fluxos de pagamento, inviabilizando o modelo de negócios. Nesta direção, sugere-se o emprego dos padrões ERC20 que permitem a emissão de *tokens* nativos para as transações internas do contrato. Entretanto, alerta-se, embora as transações possam operar baseadas em um *token* nativo, os custos de operação, tanto do contrato, quanto do Chainlink ainda serão em cobrados em *Ether* e *chainlink* respectivamente. Em outra direção, a adaptação do algoritmo no *blockchain hyperledger* pode facilitar a integração do protótipo com um sistema de pagamentos preexistente de forma mais adequada.

No que concerne os aspectos legais, a adoção de soluções baseadas em *blockchain* para derivativos e seguros representa questões regulatórias relevantes. Para Bambara e Allen (2018), o *blockchain* representa uma melhoria relevante para o cenário de coleta, transparência e governança de informações. Nesta conjuntura, os contratos inteligentes no *blockchain* foram originalmente concebidos para substituir contratos do mundo real, automatiza o processo de *compliance* e do cumprimento dos termos acordados (PRIETO et al., 2020). Nesse sentido, pode-se apontar três grandes desafios regulatórios que envolvem a aplicação da tecnologia *blockchain* em produtos financeiros: exigências dos mecanismos de *Know-Your-Customer* (KYC) e *Anti-Money-Laundry* (AML), incerteza sobre o status regulatório dos criptoativos e a ausência de arcabouço legal quanto à natureza jurídica dos *blockchain* (YEOH, 2017; POPOVIC et al., 2020).

Por este ângulo, o conflito do anonimato com as exigências legais de KYC e AML dos principais órgãos reguladores na maioria dos países pode ser mitigado com a adoção de camadas de verificação de identidade ou requisitos adicionais de entrada de dados para a contratação de instrumentos financeiros, com base na tecnologia *blockchain*. Entretanto, ausência de um arcabouço legal sobre a natureza jurídica dos *blockchain* (com permissão e sem permissão) constitui impedimentos importantes para a intensificação no uso de soluções *blockchain* no setor financeiro (POPOVIC et al., 2020). Em termos de jurisdição e lei aplicável ao *block-*

chain, a delimitação da territorialidade é fundamental e cada nó da rede pode estar sujeito a um conjunto diferente de leis, permite diferentes interpretações do arcabouço legal. Assim, ainda é inequívoco a necessidade do estabelecimento de leis e normas acerca do *blockchain* para a massificação das soluções baseadas em registro distribuído.

No que tange a viabilidade do protótipo, os custos estimados de *deploy* do contrato, fornecimento de saldo para o oráculo, somados aos custos do *frondend* foram de aproximadamente de R\$ 1100,00. De maneira geral, estes custos estimados precisam ser tratados com cautela. Primeiramente, porque não observaram a legislação quanto a taxas de inscrição de CNPJ ou semelhantes. Em segundo, porque a escala tratada foi de um protótipo. Entretanto, quando observado a inexistência da necessidade de uma força de trabalho para o processo burocrático de processamento dos instrumentos financeiros (venda, aquisição e exercício das funções) permite inferir que mesmo acrescidos dos custos legais da formalização de uma empresa, a atividade da aplicação apresenta condições de viabilidade econômica. De forma geral, pode-se afirmar que o ponto fundamental na elaboração de instrumentos financeiros viáveis no *blockchain* é concatenar a parte técnica (desenho adequado do contrato inteligente ou *chaincode*) e do modelo de negócio (precificação acurada dos produtos).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção de encerramento se apresentam as conclusões da pesquisa, alinhadas a partir dos objetivos específicos estabelecidos e objetivo geral. Finaliza-se apresentando as limitações e recomendações da pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade de uma plataforma baseada em tecnologia *blockchain* para negociação de derivativos climáticos. Nos estágios iniciais da pesquisa verificou-se a necessidade de se avaliar a aplicação do *blockchain* conjuntamente com instrumentos financeiros reais. Nesta direção, ao observar a literatura optou-se por utilizar no protótipo *blockchain*, instrumentos de gerenciamento de risco climático, pois convergem com o tema *blockchain* no que tange os aspectos de inovação, ao mesmo tempo em que oferecem lacunas relevantes a serem exploradas.

A pesquisa combinou dois temas distintos na produção de um protótipo funcional. Isto permitiu investigar e sistematizar os aspectos técnicos para construção de protótipos de aplicações para instrumentos financeiros baseados no *blockchain*. Concomitante, aplicou-se o modelo de precificação de derivativos climáticos de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) ainda não utilizado em séries históricas de cidades brasileiras.

Entre as principais contribuições das pesquisas, oferecer um ponto de partida para outros estudos é fundamental. A pesquisa oferece duas contribuições não negligenciáveis. Primeiramente, oferece um guia para orientação no desenvolvimento de futuros protótipos baseados em tecnologia *blockchain*. Este guia compreende: um marco teórico sobre os aspectos mais relevantes da tecnologia de registro distribuído, a indicação da abordagem metodológica DSR que ampara o desenvolvimento de protótipos, algoritmos e aplicações conjuntamente com um modelo de precificação de instrumentos financeiros que, permite a análise da viabilidade técnica e econômica das aplicações. Em segundo, estimou-se parâmetros do modelo de Alaton, Djehiche e Stillberger (2002) e precificou-se contratos de derivativos climáticos para as localidades brasileiras selecionadas. Neste contexto foi encontrada diferenças significativas na qualidade da precificação para cidades brasileiras, adaptou-se então parâmetros do modelo para uma precificação mais adequada para o comportamento das séries históricas observadas.

De forma geral, a aplicação de *blockchain* em instrumentos financeiros envolve a compreensão de vantagens e desvantagens da tecnologia. Neste sentido, aponta-se enquanto

inexistir um marco regulatório definido sobre a natureza legal do *blockchain* a adoção e implementação da tecnologia será cautelosa. A ausência de segurança jurídica implica em custos de transação quanto a aplicação do *blockchain* de forma massificada. Sob ponto de vista de instituições financeiras estabelecidas, o custo de adoção de soluções baseadas *blockchain* do tipo privado (ou *permissioned*) para produtos e serviços que fazem parte do *core business* é elevado. No entanto, em médio prazo, o *blockchain* pode oferecer vantagens na geração de valor em soluções compartilhadas como registro de identidade, escrituração de ativos e meios de pagamento alternativos.

Em mesma medida, aponta-se que desde o surgimento da tecnologia *blockchain*, as organizações assimilaram e adaptaram parte do modelo e de soluções ofertadas pelos registros distribuídos, e em mesmo sentido a tecnologia da informação como *cloud computing* permitiu avanços significativos que reduziram as vantagens comparativas do *blockchain* em relação a outras tecnologias.

No que concerne o *blockchain* público (ou *permissionless*), instituições financeiras podem se beneficiar de uma plataforma de baixos custos para a prototipação rápida de produtos e serviços financeiros, em especial, produtos em áreas adjacentes e negligenciadas. No entanto, a utilização de *blockchain* do tipo *permissionless* implicam no uso de criptomoedas pode se limitar o uso a nichos enquanto inexistir um entendimento jurídico específico para as criptomoedas. No que tange a utilização de *blockchain* do tipo *permissioned* por bancos e instituições financeiras, a literatura observada, conjuntamente com as limitações técnicas e legais encontradas no processo de construção do protótipo, sugere que o sucesso na aplicação do *blockchain* é dependente do processo de *open-banking* e outras iniciativas de consórcio. Em adição, é observado que o aperfeiçoamento do *cloud computing* oferece alternativas flexíveis a aplicação de *blockchain* em serviços financeiros tradicionais.

No que concerne o protótipo desenvolvido, verificou-se a viabilidade técnica e econômica na utilização de *blockchain* na construção um ambiente digital autônomo e descentralizado para negociação de instrumentos financeiros com baixa complexidade. Este protótipo oferece um ponto de partida para outras aplicações tanto para organizações autônomas descentralizadas quanto para empresas estabelecidas. No entanto, devido a volatilidade na cotação de criptomoedas (as quais baseiam parte fundamental dos custos de operação de contratos inteligentes em *blockchain* do tipo *permissionless*), sugere-se a utilização do padrão ERC-20, que permite a utilização de um *token* para intermediar as operações no contrato.

Por outro lado, o aperfeiçoamento do mercado de derivativos climáticos mostra-

se uma alternativa viável no gerenciamento do risco climático no agronegócio. As mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global alteram os padrões climáticos, aumentam a frequência de eventos extremos adicionando risco no planejamento de atividades econômicas, predominantemente expostas ao tempo. Segundo o IPCC (2019), modelos climáticos projetam diferenças robustas nas características climáticas regionais entre o aquecimento atual e global. De forma similar, o Banco Mundial (2016) estima que as perdas econômicas relacionadas com o aquecimento global sejam de aproximadamente 300 bilhões de dólares por ano. Entretanto, segundo o IPCC (2019) apenas 30% das perdas possuíam algum tipo de instrumento financeiro de proteção. Neste ínterim, a possibilidade de estruturar instrumentos financeiros de proteção contra o clima em diferentes configurações oferece uma alternativa em relação aos seguros rurais tradicionais. Embora, os seguros rurais tradicionais possuam fortes incentivos governamentais via subvenções federais, demandam esforço fiscal não negligenciável, o que pode apresentar reduções significativas em sua oferta em períodos de crise econômica.

No que tange os aspectos técnicos, o funcionamento de um derivativo climático com limite de pagamento é análogo em sua operação a seguros paramétricos o que pode oferecer uma melhoria significativa na comunicação e oferta destes produtos. Segundo Raucci (2019) ao não fixar o valor de indenização paga ao produtor à produtividade da lavoura, o incentivo à utilização de estratégias de gerenciamento da produção sub-ótimas inexistem. Nesta direção, as opções de *call* precificadas objetivaram oferecer uma proteção contra o excesso de temperatura acumulada, fenômeno altamente correlacionado com redução da produtividade da lavoura.

Os valores encontrados para as opções desenhadas ficaram entre 80 R\$ a 160 R\$, para cobrir valores de R\$ 5 (aproximadamente) por grau acumulado, limitados até 300 graus acima do *strike*. Por questões de simplificação, o preço justo do contrato ignora custos administrativos e margens de lucro da plataforma. Contudo, quando acrescidos os custos de lançamento e aquisição das opções (em média R\$ 126,00) os valores ainda mostram-se viáveis economicamente quando comparados a seguros tradicionais. Em adição, admite-se que uma relação prêmio limite pode ser melhor ajustada para melhorar a atratividade para os lançadores. De forma similar, este ajuste pode evitar o *default* da plataforma em caso de evento climático extremo. Em adição, alerta-se que alterações nas cotações de Ethers podem inviabilizar a operação comercial do contrato na ausência de algum *token* para intermediar as transações.

Em síntese, a pesquisa objetivou demonstrar por meio de uma prova de conceito o potencial e a viabilidade da aplicação da tecnologia *blockchain* em produtos financeiros. Nesta direção, delimitou-se como produto financeiro derivativos climáticos com aplicação para

o agronegócio. Embora, a tecnologia *blockchain* esteja em estágios iniciais de desenvolvimento, a viabilidade tanto técnica e econômica é inequívoca. Mostra-se valioso oferecer um ponto de partida para o desenvolvimento de outros protótipos, com objetivo a prover soluções para diferentes áreas. De forma similar, o estudo e aplicação de instrumentos de gerenciamento de risco climático apresenta alternativas tanto para produtores rurais como para *policy maker* na formulação de políticas para o setor agroindustrial.

5.2 IMPLICAÇÕES DO ESTUDO

Entre as implicações indispensáveis apresentadas no estudo, a combinação de dois temas distintos (*blockchain* e derivativos climáticos) com uma abordagem interdisciplinar e duas estratégias de pesquisa (DSR e estatística), constitui um ponto de partida relevante, para que outros estudos possam combinar diferentes objetos de estudo com diversas técnicas e abordagens metodológicas em ciências sociais aplicadas.

Em vista disto, o estudo apresenta, com rigor acadêmico, soluções para problemas práticos e cotidianos da sociedade, observa o surgimento de fenômeno recente (*blockchain*) com implicações em diversas áreas conjuntamente com um problema real (risco e mudanças climáticas).

5.3 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A presente investigação foi limitada em quatro pontos principais. Primeiro, pela necessidade de concatenar diferentes objetos de pesquisa no desenvolvimento de uma prova de conceito. Segundo, ausência de arcabouço teórico consolidado acerca da tecnologia *blockchain*. Terceiro, dificuldade no enquadramento metodológico adequado para a compreensão da aplicação da tecnologia. Quarto, limitações relativas a aplicação do modelo de precificação de derivativos climáticos.

Pesquisas futuras podem avançar no estudo de aplicações *blockchain* para o sistema financeiro desenvolvendo protótipos ou provas de conceito baseadas em *blockchain* do tipo *permissioned*. Na mesma proporção, outras soluções e produtos financeiros podem ser desenvolvidos como seguros, fundos de investimento e financiamentos agrícolas coletivos. De forma similar, outros modelos de estimação e precificação para derivativos climáticos podem ser desenvolvidos, aprofundando-se na sustentabilidade dos produtos desenvolvidos e ampliando a gama de índices climáticos cobertos.

REFERÊNCIAS

- ALATON, Peter; DJEHICHE, Boualem; STILLBERGER, David. On Modelling and Pricing Weather Derivatives. **Applied Mathematical Finance**, v. 9, p. 1–20, 2002.
- ALLEN, Sarah et al. Design choices for central bank digital currency policy and technical considerations. **NBER Working Paper**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2016. ISSN 1098-6596.
- APPOLINÁRIO, Fabio. **Metodologia da ciência : filosofia e prática da pesquisa**. 2. ed.. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 3195 p. ISBN 9788524911705.
- BAMBARA, Joseph J.; ALLEN, Paul R. **Blockchain: A practical guide to developing business, law, and technology solutions**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 9781260115864.
- BEHNKE, Kay; JANSSEN, M. F.W.H.A. Boundary conditions for traceability in food supply chains using blockchain technology. **International Journal of Information Management**, Elsevier, n. March, p. 1–10, 2019. ISSN 02684012.
- BENTH, F. E.; BENTH, Jūratė šaltytė. The volatility of temperature and pricing of weather derivatives. **Quantitative Finance**, p. 37–41, 2007.
- BENTH, Fred Espen; PERSIO, Luca Di. Stochastic Modeling of Wind Derivatives in Energy Markets. **Risks**, v. 6, p. 1–21, 2018.
- BERG, Chris; DAVIDSON, Sinclair; POTTS, Jason. Blockchains Industrialise Trust. **Papers SSRN**, n. November 2017, p. 1–5, 2017.
- BERNSTEIN, Peter L. **Desafio aos deuses: a fascinante história do risco**. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 1997.
- BIRYUKOV, Alex; KHOVRATOVICH, Dmitry; TIKHOMIROV, Sergei. Findel: Secure Derivative Contracts for Ethereum. **International Conference on Financial Cryptography and Data Security**, p. 453–467, 2016.
- BLACK, Fischer; SCHOLES, Myron. The Pricing of Options and Corporate Liabilities F. **Journal of Political Economy**, v. 81, n. 3, p. 637–654, 1973.
- BLOSTEIN, Alexander et al. **Profiles in Innovation Blockchain: Putting Theory into practice**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://pgcoin.tech/wp-content/uploads/2018/06/blockchain-paper.pdf>>.
- BROPHY, Richard. Blockchain and insurance: a review for operations and regulation. **Journal of Financial Regulation and Compliance**, v. 28, n. 2, p. 215–234, 2020.
- BUANAIN, Antônio Márcio; SILVEIRA, Rodrigo Lanna F. **Manual de avaliação de riscos na agropecuária: um guia metodológico**. Rio de Janeiro: ENS-CPES, 2017. ISBN 9788570526212.
- CAO, Melanie; LI, Anlong; WEI, Jason. Weather Derivatives: A New Class of Financial Instruments. 2003.
- CAO, Melanie; WEI, Jason. Weather derivatives valuation and market price of weather risk. **The Journal of Future Markets**, v. 24, n. 11, p. 1065–1089, 2004.

- CATALINI, Christian; GANS, Josha S. Some simple economics of the Blockchain. **National Bureau of Economic Research**, p. 32 – 117, 2016.
- CIOCARLIE, Gabriela; ELDEFRAWY, Karim. BlockCIS — A Blockchain-based Cyber Insurance System. **IEEE International Conference on Cloud Engineering**, 2018.
- COETZEE, Johan. Strategic implications of Fintech on South African retail banks. **South African Journal of Economic and Management Sciences ISSN: (Online) 2222-3436, (Print) 1015-8812 Page**, p. 1–11, 2018.
- CONG, Lin William; LI, Ye; WANG, Neng. Tokenomics: Dynamic Adoption and Valuation. **The Review of Financial Studies**, 2020. ISSN 0893-9454.
- CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa: Métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Porto Alegre: Bookman, 2007. 248 p. ISBN 9788536308920.
- DHILON, Vikram; METCALF, David; HOOPER, Max. **Blockchain enabled Applications Understand the Blockchain Ecosystem**. Orlando: Apress, 2017. ISSN 0270-6474, 0270-6474. ISBN 9781484230800.
- DORNIER, Q; QUEREL, M. Caution to the wind. energy and power risk management. **Weather risk special report**, 2000.
- DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES, José Antônio Valle. Design science research. In: **Design science research**. Switzerland: Springer, 2015. p. 67–102. ISBN ISBN 978-3-319-07373-6.
- DZUPIRE, Nelson Christopher; NGARE, Philip; ODONGO, Leo. Pricing basket weather derivatives on rainfall and temperature processes. **International Journal of Financial Studies**, v. 7, n. 3, 2019. ISSN 22277072.
- EMBRAPA. **Estresses de ordem fisiológicas**. Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/820371/estresses-em-soja>>.
- ENDER, Manuela; ZHANG, Ruyuan. Efficiency of weather derivatives for Chinese agriculture industry. **China Agricultural Economic Review**, 2015.
- FANNING, Kurt; CENTERS, David P. Blockchain and Its Coming Impact on Financial Services. **The journal corporate accounting and finance**, p. 53–57, 2016.
- FMI. **The Rise of Digital Money**. [S.l.], 2019. Disponível em: <www.imf.org/T1\guilsinglrightFiles\T1\guilsinglrightEnglish\T1\guilsinglrightFTNEA2019001{%}0A>.
- GIAMBIAGI, Fábio. **Derivativos e risco de mercado**. São Paulo: GEN Atlas, 2017. ISBN 9788595154742.
- GÖNCÜ, Ahmet. Pricing temperature-based weather derivatives in China. **Journal of Risk Finance**, v. 13, n. 1, p. 32–44, 2011. ISSN 09657967.
- HABER, Stuart; STORNETTA, W Scott. How to Time-Stamp a Digital Document. **Advances in Cryptology**, p. 437–455, 1991.
- HALABURDA, Hanna et al. The microeconomics of cryptocurrencies. **NBER Working Paper**, 2020.

HEVNER, Alan; CHATTERJEE, Samir. Design science research in information systems. In: **Design research in information systems**. New York: Springer, 2010. p. 9–22. ISBN 9781441956521.

HULL, John C. **Opções, futuros e outros derivativos**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2016. ISBN 9788582603932.

JEWSON, Stephen; BRIX, Anders. **Weather Derivative Valuation: The Meteorological, Statistical, Financial and Mathematical Foundations**. New York: Cambridge University Press, 2005. ISBN 9780521843713.

JEWSON, Stephen; CABALLERO, Rodrigo. The use of weather forecasts in the pricing of weather derivatives. **Meteorological Applications**, v. 389, p. 377–389, 2003.

KERMICHE, L; VUILLERMET, N. Weather derivatives structuring and pricing : a sustainable agricultural approach in Africa. **Applied Economics**, v. 6846, n. March, 2016.

KING, Brett. **Bank 4.0: Banking Everywhere, Never at a Bank**. Chichester: Willey, 2019.

KORDI, Konstantina. **Pricing wheater derivatives**. Dissertação (Mestrado) — University of Piraeus, 2012.

LOPES, Lucas Lourenço. **Minimização de risco de base geográfico de derivativos climáticos no Brasil**. Tese (Doutorado), 2018.

MANFREDO, Mark R; RICHARDS, Timothy J. Hedging with weather derivatives: a role for options in reducing basis risk. **Applied Financial Economics**, Taylor & Francis, v. 19, n. 2, p. 87–97, 2009.

MAPA. **Atlas do Seguro Rural**. Brasil: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/atlasdoseguro/index.htm>>.

MARTIN, Steven W.; BARNETT, Barry J.; COBLE, Keith H. Developing and Pricing Precipitation Insurance. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 26, n. 1, p. 261–274, 2001. ISSN 10685502.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. **Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to.** [S.l.], 2018.

MORKUNAS, Vida J; PASCHEN, Jeannette; BOON, Edward. How blockchain technologies impact your business model. **Business Horizons**, "Kelley School of Business, Indiana University", v. 62, n. 3, p. 295–306, 2019. ISSN 0007-6813. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.01.009>>.

MOUGAYAR, William. **The business Blockchain: promise, practice, and application of the next internet technology**. Hoboken,: John Wiley & Sons, Inc, 2016. ISBN 9781119300311.

MOURA, Henrique Perlatto. Blockchain e Banco Central – Um Contraponto da Tecnologia. **Banco Central do Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://revistapgbc.bcb.gov.br/index.php/revista/article/view/1062>>.

MUKHOPADHYAY, Mayukh. **Ethereum Smart Contract Development**. Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2018. ISBN 9781788473040.

MUSSHOFF, Oliver; ODENING, Martin; XU, Wei. Management of climate risks in agriculture - will weather derivatives permeate? **Applied Economics**, v. 43, n. 9, p. 1067–1077, 2011. ISSN 00036846.

NAKAMOTO, Satoshi. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. v. 39, n. 1, p. 53–67, 2008. ISSN 09254560. Disponível em: <<https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>>.

OHAM, Chuka et al. B-FICA : BlockChain based Framework for Auto-insurance Claim and Adjudication. **IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)**, IEEE, p. 1171–1180, 2018.

OZAKI, Vitor Augusto. **Métodos atuariais aplicados à determinação da taxa de prêmio de contratos de seguro agrícola: um estudo de caso**. Tese (Phd Thesis) — Universidade de São Paulo, 2005.

POPOVIC, D et al. Understanding blockchain for insurance use cases. **British Actuarial Journal**, v. 25, p. 1–23, 2020.

PÖRTNER, H.-O. et al. **Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. [S.l.], 2019.

PRIETO, Javier et al. **Blockchain and Applications**. [S.l.]: Springer, 2020. 11–18 p. ISSN 21945365. ISBN 9783030238124.

RAIKWAR, Mayank et al. A Blockchain Framework for Insurance Processes. **th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)**. IEEE., 2018.

RAUCCI, Gian Lucca. **Derivativos climáticos no Brasil : Uma análise para gestão de risco da produção de soja**. Dissertação (Mestrado) — Unicamp, 2019.

RAUCCI, Gian Lucca; HENRIQUE, Daniel; CAPITANI, Dario. Viabilidade de implantação de derivativos climáticos: uma análise para gestão de risco na produção de soja. n. November, 2017.

RAUCCI, Gian Lucca et al. Development of wheater derivatives: evidence from the Brazilian soybean market. **Italian Review of Agricultural Economics**, v. 74, p. 17–28, 2019.

RIASANOW, Tobias; HERMES, Sebastian. Core, intertwined, and ecosystem-specific clusters in platform ecosystems: analyzing similarities in the digital transformation of the automotive , blockchain , financial , insurance and IIoT industry. **Eletronic Markets**, Electronic Markets, 2020.

SAMPIERI, Roberto Hernandez; CALLADO, Carlos Fernandes; LUCIO, Maria Del Pilar Baptista. **Metodologia De Pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SHARMA, Anil K; VASHISTHA, Ashutosh. Weather derivatives : risk-hedging prospects for griculture and power sectors in India. **The Journal of Risk Finance**, v. 8, p. 112 – 132, 2007.

SHETH, Alpen; SUBRAMANIAN, Hemang. Blockchain and contract theory: modeling smart contracts using insurance markets. **Managerial finance**, 2018.

SHUKLA, P.R. et al. **Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.** [S.l.], 2019.

SILVEIRA, Fernando Alves; CAMILO, Silvio Parodi Oliveira. Designing weather derivatives using Blockchain: An application on Brazilian soybean and corn market. **Anais do Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração, on-line**, 44, 2020.

ŠPIČKA, J. Weather derivative design in agriculture – a case study of barley in the Southern Moravia Region Key words Anotace. **Agris on-line Papers in Economics and Informatics**, III, n. 3, p. 53–59, 2011.

STOPPA, Andrea; HESS, Ulrich. Design and Use of Weather Derivatives in Agricultural Policies : the Case of Rainfall Index Insurance in Morocco. **International conference Agricultural policy reform and WTO**, 2003.

SUBRAMANIAN, Hemang. Security tokens : architecture , smart contract applications and illustrations using SAFE. **Managerial Finance**, 2018.

SURUJNATH, Ryan. Off the chain! A guide to Blockchain derivatives markets and the implications on systemic risk. **Fordham Journal of Corporate and Financial Law**, v. 22, p. 257–304, 2017.

SWAN, Melanie. **Blockchain. Blueprint for a New Economy.** [S.l.]: O’ Reilly Media Inc, 2015. ISBN 9781491920497.

TAPSCOTT, Don; TAPSCOTT, Alex. **Blockchain revolution : how the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world.** New: Penguin Random House, 2018. ISBN 9781101980149.

THAKOR, Anjan V. Strategic information disclosure when there is fundamental disagreement. **Journal of financial intermediation**, Elsevier Inc., p. 1–23, 2014.

TURVEY, Calum. The Essentials of Rainfall Derivatives and Insurance. **Working paper, Department of Agricultural Economics and Business University of Guelph**, 1999. Disponível em: <<https://ageconsearch.umn.edu/record/244738/files/guelph-wp-99-06.pdf>>.

TURVEY, Calum G. Weather Derivatives for Specific Event Risks in Agriculture. **Review of Agricultural Economics**, v. 23, n. 2, p. 333–351, 2001.

TURVEY, Calum G.; KONG, Rong. Weather risk and the viability of weather insurance in China’s Gansu, Shaanxi, and Henan provinces. **China Agricultural Economic Review**, v. 2, n. 1, p. 5–24, 2010. ISSN 17561388.

UPADHYAY, Nitin. **UnBlock the Blockchain.** Singapore: Springer, 2019. ISBN 9789811501760.

- VAISHNAVI, Vijay K; KUECHLER, William. **Design science research methods and patterns: innovating information and communication technology**. [S.l.]: Crc Press, 2015. ISBN 9781498715263.
- VAKILINIA, Iman; BADSHA, Shahriar; SENGUPTA, Shamik. Crowdfunding the Insurance of a Cyber-Product Using Blockchain. **9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)**, IEEE, p. 964–970, 2018.
- VO, Hoang Tam et al. Blockchain-based Data Management and Analytics for Micro-insurance Applications. **Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management.**, p. 2539–2542, 2017.
- WMO. Catalogue for climate data. 2020. Disponível em: <<https://climatedata-catalogue.wmo.int/>>.
- World Bank, IFC. **World Bank Group Climate Change Action Plan 2016–2020**. Washington DC, 2016. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24451>>.
- WU, Tong; LIANG, Xiubo. Exploration and practice of inter-bank application based on blockchain. **ICCSE 2017 - 12th International Conference on Computer Science and Education**, n. Iccse, p. 219–224, 2017.
- YEOH, Peter. Regulatory issues in blockchain technology. **Journal of Financial Regulation and Compliance**, Emerald Publishing Limited, 2017.
- YERMACK, David. Corporate governance and blockchains. **Review of Finance**, v. 21, n. 1, p. 7–31, 2017. ISSN 1573692X.
- YUAN, Yong; WANG, Fei Yue. Blockchain and Cryptocurrencies: Model, Techniques, and Applications. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, IEEE, v. 48, n. 9, p. 1421–1428, 2018. ISSN 21682232.
- ZAPRANIS, Achilleas; ALEXANDRIDIS, Antonios. **Weather derivatives**. London: Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 9781461460701.
- ZENG, Lixin. Pricing Weather Derivatives. **The Journal of Risk Finance**, 2000.
- ZHANG, Peng et al. FHIRChain : Applying Blockchain to Securely and Scalably Share Clinical Data. **Computational and Structural Biotechnology Journal**, The Authors, v. 16, p. 267–278, 2018. ISSN 2001-0370. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.07.004>>.

A APÊNDICES

A.1 APÊNDICE A - CONTRATO INTELIGENTE ESCRITO EM LINGUAGEM *SOLIDITY*

```
pragma solidity ^0.6.0;
pragma experimental ABIEncoderV2;

import "@chainlink/contracts/src/v0.6/ChainlinkClient.sol";

contract WeatherDerivative is ChainlinkClient{

    struct option {
        uint maturity;
        uint strike;
        uint payoff;
        uint limit;
        uint location;
        uint tick;
        uint id;
        address launcher;
    }

    struct order {
        address holder;
        uint maturity;
        uint strike;
        uint payoff;
        uint limit;
        uint location;
        uint tick;
        uint id;
        address launcher;
    }
}
```

```

mapping(uint256 => option) optionList;
mapping(uint256 => order) orderList;

constructor() public {
    setPublicChainlinkToken();
    oracle = 0x2f90A6D021db21e1B2A077c5a37B3C7E75D15b7e;
    jobId = "29fa9aa13bf1468788b7cc4a500a45b8";
    fee = 0.1 * 10 ** 18; // 0.1 LINK
    owner = msg.sender;
    Option_id = 1;
    Order_id = 1;
}

address public owner;
modifier ownerOnly {
    require(msg.sender == owner);
    _;
}

address private oracle;
bytes32 private jobId;
uint256 private fee;
uint private Option_id;
uint private Order_id;

uint public Jatai;
uint public Irati;
uint public RioVerde;

uint256 public _Jatai;

```

```

uint256 public _Irati;
uint256 public _RioVerde;

uint256 public _JataiID;
uint256 public _IratiID;
uint256 public _RioVerdeID;

function getLestOptionId() public view returns (uint256) {
    return Option_id;
}

function getLestOrderId() public view returns (uint256) {
    return Order_id;
}

function submitOption (uint maturity, uint strike,
uint payoff, uint limit, uint location, uint tick) public
payable ownerOnly returns (bool){
    require(msg.value == ((limit * tick) +
((limit * tick) / 100)));
    option memory newOption =
    option(maturity, strike, payoff,
    limit, location, tick, Option_id, msg.sender);
    optionList[Option_id] = newOption;
    Option_id++;
    return (true);
}

function _findDD(uint _location) view public
returns (uint DD) {
    if (_location == 1) {
        DD = Jatai;
    }else if (_location == 2){

```

```

        DD = Irati;
    }else if (_location == 3) {
        DD = RioVerde;
    }
    return DD;
}

function submitOrder (uint id) payable public
returns (bool) {
    uint _payoff = optionList[id].payoff;
    uint _limit = optionList[id].limit;
    uint _strike = optionList[id].strike;
    uint _maturity = optionList[id].maturity;
    uint _location = optionList[id].location;
    uint _tick = optionList[id].tick;
    address _launcher = optionList[id].launcher;
    require(msg.value == _payoff + (_payoff / 100));
    delete optionList[id];
    order memory newOrder = order(msg.sender, _maturity,
    _strike, _payoff, _limit, _location, _tick,
    id, _launcher);
    orderList[id] = newOrder;
    Order_id++;
    return (true);
}

function exerciseOption (uint id) public {
    uint _payoff = orderList[id].payoff;
    uint _strike = orderList[id].strike;
    uint _tick = orderList[id].tick;
    uint _limit = orderList[id].limit;
    uint _location = orderList[id].location;

```

```

uint _maturity = orderList[id].maturity;
uint DD = _findDD(_location);
address payable _owner_ = address(uint160(owner));
address payable _holder_ = address(uint160
(orderList[id].holder));
address payable _launcher_ = address(uint160
(orderList[id].launcher));
require(_maturity < now, "execução antes do vencimento");
require(DD > 0, "DD não observado no oráculo");

    if (DD > _strike) {
        if ((DD - _strike) < _limit) {
            _holder_.transfer((DD - _strike) * _tick);
            _launcher_.transfer(
                ((_payoff + (_limit * _tick)) -
                ((DD - _strike) * _tick)));
            delete orderList[id];
        } else if ((DD - _strike) > _limit) {
            _holder_.transfer((_limit * _tick) + _payoff);
            _owner_.transfer((_limit * _tick) / 100);
            delete orderList[id];
        }
    } else if (DD < _strike) {
        _launcher_.transfer((_payoff + (_tick * _limit)));
        _owner_.transfer(
            ((_payoff + (_tick * _limit))) / 100);
        delete orderList[id];
    }
}
}

```



```

function getOptionDetails(uint id) public view returns (

    uint, // maturity;
    uint, //strike;
    uint, //payoff;
    uint, //limit;
    uint, //location;
    uint, //tick;
    uint, //id;
    address //launcher;
) {
    option memory listedOption = optionList[id];
    return (
        listedOption.maturity,
        listedOption.strike,
        listedOption.payoff,
        listedOption.limit,
        listedOption.location,
        listedOption.tick,
        listedOption.id,
        listedOption.launcher

    );
}

```

```

function getOrderDetails(uint id) public view returns (
    address, //holder;
    uint, //maturity;
    uint, //strike;
    uint, //payoff;
    uint, //limit;

```

```

uint, //location;
uint, //tick;
uint, //id;
address //launcher;
) {
    order memory listedOrders = orderList[id];
    return (
        listedOrders.holder,
        listedOrders.maturity,
        listedOrders.strike,
        listedOrders.payoff,
        listedOrders.limit,
        listedOrders.location,
        listedOrders.tick,
        listedOrders.id,
        listedOrders.launcher
    );
}

```

```

function Balance() public view returns (uint) {
    return address(this).balance;
}

```

```

function requestJataiDD() public returns (bytes32 _JataiID)
{
    Chainlink.Request memory requestJatai =
    buildChainlinkRequest (jobId, address(this),
    this.fulfillJatai.selector);
    if (now > 1635724800) {
        requestJatai.add("get", "link");
    } else if (now > 1630454400) {

```

```

        requestJatai.add("get", "link");
    }else if (now > 1625097600) {
        requestJatai.add("get", "link");
    }else if (now > 1619827200) {
        requestJatai.add("get", "link");
    }else if (now > 1614556800) {
        requestJatai.add("get", "link");
    }else if (now > 1609459200) {
        requestJatai.add("get", "link");
    }
    requestJatai.add(
        "path", "locations.jatai,br.values.58.cumulativegreedays");
    requestJatai.addInt("times", 1);
    return sendChainlinkRequestTo(oracle, requestJatai, fee);
}

```

```

function fulfillJatai(bytes32 _JataiID, uint256 _Jatai)
public recordChainlinkFulfillment(_JataiID)
{
    Jatai = _Jatai;
}

```

```

function getJataiDD () public view returns (uint256) {
    return Jatai;
}

```

```

function requestIratidd() public returns (bytes32 _Iratidd)

```

```

{
    Chainlink.Request memory requestIrati =
    buildChainlinkRequest(jobId, address(this),
    this.fulfillIrati.selector);
    if (now > 1635724800){
        requestIrati.add("get", "link");
    }else if(now > 1630454400) {
        requestIrati.add("get", "link");
    }else if (now > 1625097600) {
        requestIrati.add("get", "link");
    }else if (now > 1619827200) {
        requestIrati.add("get", "link");
    }else if (now > 1614556800) {
        requestIrati.add("get", "link");
    }else if (now > 1609459200) {
        requestIrati.add("get", "link");
    }

    requestIrati.add(
    "path", "locations.irati,br.values.58.cumulativegreedays");
    requestIrati.addInt("times", 1);
    return sendChainlinkRequestTo(oracle, requestIrati, fee);
}

function fulfillIrati(bytes32 _IratiID, uint256 _Irati)
public recordChainlinkFulfillment(_IratiID)
{
    Irati = _Irati;
}

```

```

function getIratiDD () public view returns (uint256) {
    return Irati;
}

```

```

function requestRioVerdeDD() public
returns (bytes32 _RioVerdeID)
{
    Chainlink.Request memory requestRioVerde =
    buildChainlinkRequest(jobId, address(this),
this.fulfillRioVerde.selector);
    if (now > 1635724800){
        requestRioVerde.add("get", "link");
    }else if(now > 1630454400) {
        requestRioVerde.add("get", "link");
    }else if (now > 1625097600) {
        requestRioVerde.add("get", "link");
    }else if (now > 1619827200) {
        requestRioVerde.add("get", "link");
    }else if (now > 1614556800) {
        requestRioVerde.add("get", "link");
    }else if (now > 1609459200) {
        requestRioVerde.add("get", "link");
    }

    requestRioVerde.add("path",
"locations.rioverde,br.values.58.cumulativedegreedays");
    requestRioVerde.addInt("times", 1);
    return sendChainlinkRequestTo(oracle, requestRioVerde, fee);
}

```

```

function fulfillRioVerde(bytes32 _RioVerdeID, uint256 _RioVerde)

```

```

public recordChainlinkFulfillment(_RioVerdeID)
{
    RioVerde = _RioVerde;
}

function getRioVerdeDD () public view returns (uint256) {
    return RioVerde;
}

function kill() public onlyOwner {
    selfdestruct(owner);
}
}

```

A.2 APÊNDICE B - ALGORÍTIMO DE ESTIMAÇÃO E PRECIFICAÇÃO DE DERIVATIVOS CLIMÁTICOS EM R

```

library(tidyverse)
#tetha function to estimate A, B, C and phi params
tetha <- function(tmedia) {
  time <- rep((seq(1:365)), length(tmedia)/365)
  serie <- data.frame(tmedia[1:length(time)], time)

  tetha_model <- lm(serie$tmedia ~ serie$time +
sin(2*pi*(serie$time)/365) +
cos(2*pi*(serie$time/365)), data = serie)
  tpredict <- predict.lm(tetha_model)
  Parameters = coef(tetha_model)
  A = Parameters[1]
  B = Parameters[2]
  C = sqrt(Parameters[3]^2+Parameters[4]^2)
}

```

```

phi = (atan(Parameters[4]/Parameters[3]) - pi)

print(A)
print(B)
print(C)
print(phi)

return(tpredict)
}

#Speed of mean reversion
sigma <- function(tmedia) {
  counter <- 1
  sum_temp <- NA
  while (counter < length(tmedia)) {
    sum_temp[counter] <- (tmedia[counter + 1] - tmedia[counter])^2
    counter <- counter + 1
  }
  return( (1/length(tmedia))* (sum(sum_temp, na.rm = TRUE)) )
}

#Volatility estimation
alpha <- function(tmedia, tpredict, sigma) {
  counter <- 2
  y <- NA
  Y <- NA
  while (counter < length(tmedia)) {
    y[counter] <- (tpredict[counter-1] -
    tmedia[counter -1] / sigma) * (tmedia[counter] -
    tpredict[counter])
    Y[counter] <- (tpredict[counter-1] -
    tmedia[counter -1] / sigma) * (tmedia[counter-1] -
    tpredict[counter-1])
  }
}

```

```

    counter <- counter + 1
  }
  return(-log(sum(y, na.rm = TRUE)/sum(Y, na.rm = TRUE)))
}

#Ornstein-Uhlenbeck simulation process

#1 steep: simple simulation of OU process
ou_simulation <- function(To, A, B, C, alpha, omega,
sigma, path, lambda, phi) {
  paths <- seq(1:path)
  i <- 2
  paths[1] <- To
  while (i <= path) {
    paths[i] <- A + B*(paths[i]+1) +
    C*sin((omega*(paths[i] + 1) + phi)) +
    (1 - alpha) * paths - (A + B* paths[i] +
    C*sin(omega+paths[i]+phi)) +
    sigma*rnorm(1) - lambda*sigma
    i <- i + 1
  }
  return(paths)
}

#2 steep: repeat and storage results of OU simulation
ou_process <- function(To, A, B, C, alpha, omega, sigma,
path, lambda, phi, repets) {
  j <- 1
  results <- data.frame(seq(1:365))
  for (j in 1:repets) {
    results[,j] <- ou_simulation(To, A, B, C, alpha,
omega, sigma, path, lambda, phi)
  }
}

```



```

    j <- j + 1
  }
  p <- 1
  z <- NA
  for (p in 1:365) {
    z[p] <- (sum(results[p,1:repets])/repets)
    p <- p + 1
  }
  return(z)
}

monte_carlo <- function(To, A, B, C, alpha, omega, sigma, path,
lambda, phi, repets, K, r, repet, tick) {
  PayoffCall <- data.frame(seq(1:repet))
  PayoffPut <- data.frame(seq(1:repet))
  i <- 1
  H <- NA
  SimPayoffCall <- NA
  SimPayoffPut <- NA

  #values <- ou_process(To, A, B, C, alpha, omega,
sigma, path, lambda, phi, repets)
  while (i <= repet) {
    values <- ou_process(To, A, B, C, alpha, omega,
sigma, path, lambda, phi, path)
    H[i] <- sum(max(To - values[1:365]))
    #print(H)
    SimPayoffCall[i] <- exp(-r*(60))*max(H[i] - K, 0)
    SimPayoffPut[i] <- exp(-r*(60))*max(K - H[i], 0)
    i <- i + 1
  }
  print(Callprice <- (mean(PayoffCall)))
  print(Putprice <- (mean(SimPayoffPut)))
}

```

}