



MODELO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO
COMMODITY DO CAFÉ BRASILEIRO

Alexandre José Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Amit Bhaya

Rio de Janeiro

Janeiro de 2017

MODELO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO
COMMODITY DO CAFÉ BRASILEIRO

Alexandre José Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Amit Bhaya, Ph.D.

Prof. Eugenius Kaszkurewicz, D.Sc.

Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2017

Ferreira, Alexandre José

Modelo computacional da dinâmica da cadeia de suprimentos do *commodity* do café brasileiro / Alexandre José Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 116 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Amit Bhaya

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 101-104.

1. Sistemas Dinâmicos. 2. Modelagem Matemática. 3. *Commodity* do Café. I. Bhaya, Amit. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*“The best way to predict the future
is to create it” – Abraham Lincoln.*

*A meus pais, esposa e filha, e
toda família, obrigado.*

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo amor e pelo apoio prestado durante tantos anos. A meus pais, Alvina e José, que são agricultores e cafeicultores mineiros, inspiradores desde trabalho. A minha esposa Fernanda e filha Diana, que motivam a busca por felicidade. A minha irmã Fernanda, aos sobrinhos Gabriel e Lorena, aos sogros Fernando e Janici e aos cunhados Fabrício e Paula, que estão sempre presentes trazendo alegrias.

Ao Professor Amit Bhaya, devo agradecer pelo apoio nesta dissertação, pela oportunidade de trabalhar com sistemas dinâmicos e pela orientação. Agradeço a todos os examinadores por terem aceitado o convite para participar da banca desta dissertação. Finalmente à COPPE/UFRJ pela oportunidade de realizar o mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DO
COMMODITY DO CAFÉ BRASILEIRO

Alexandre José Ferreira

Janeiro/2017

Orientador: Amit Bhaya

Programa: Engenharia Elétrica

A cafeicultura brasileira passa por novos desafios, que podem mudar a estrutura de produção. O mercado do *commodity* de café sugere ser um sistema dinâmico complexo, com realimentações negativas dominantes, com atrasos de resposta, que geram oscilações com largas amplitudes. Os modelos dinâmicos existentes para o mercado do café não são práticos, não são calibrados e realistas, apesar de sugerirem que as oscilações são endógenas. Este trabalho propõe um modelo matemático e computacional da dinâmica do *commodity* do café brasileiro para investigar seu comportamento. Foi empregado o *software Stella Architect* e suas funcionalidades, que permitem a incorporação de dados e análises conjunturais de mercado, para criar um modelo matemático. O modelo dinâmico desenvolvido é capaz de estimar os estoques de árvores, a produção, as exportações, e os estoques de café verde, entre outras variáveis. Portanto, o modelo dinâmico pode ser utilizado como uma ferramenta de gerenciamento de risco e pode ser adaptado para receber outras funcionalidades e dados, além de estimar variáveis para horizontes extensos e para diferentes cenários, com alguma margem de erro, atendendo a governos, cooperativas e produtores.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPUTATIONAL MODEL OF THE SUPPLY CHAIN DYNAMICS OF THE
BRAZILIAN COFFEE COMMODITY

Alexandre José Ferreira

January/2017

Advisor: Amit Bhaya

Department: Electrical Engineering

The Brazilian coffee industry faces new challenges, which can change the structure of production. The coffee market appears to be a complex dynamic system, with dominant negative feedbacks, as well as response delays, which generate oscillations. The dynamic models proposed in the literature for the coffee market are not practical and are not fully calibrated and realistic, although they suggest that oscillations are endogenous. This paper proposes to generate a mathematical and computational model of the dynamics of the Brazilian coffee commodity to investigate its behavior. Where concepts of dynamic systems theory and statistical, associated with market data and analysis, were used. As a computational tool, the Stella Architect software and its features were employed to model the mathematical equations. The dynamic model developed can estimate tree stocks, production, exports, and gross opening stocks of green coffee, among other variables. The dynamic model can therefore be used as a risk management tool and be adapted to receive other functionalities and data, as well as estimate data for longer horizons and different scenarios, serving governments, cooperatives and producers.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e breve revisão bibliográfica	2
1.2 Objetivos	9
1.3 Estrutura	10
2 Descrição do mercado do café	11
2.1 Histórico do mercado	12
2.2 Capacidade de produção	17
2.3 Produção de café e custos	21
2.3.1 Beneficiamento de café, preços e custos de produção	22
2.4 Estoques de café verde	26
2.4.1 Estoques de café verde nas cooperativas	28
2.5 Exportações, importações e reexportações	29
2.6 Consumos de café	31
2.7 Alterações climáticas e volatilidade de preços	32
2.8 Políticas e estratégias do mercado	33
2.9 Alterações estruturais observadas	35
2.10 Relação suprimento e demanda e os preços	37
3 Revisão de dinâmica de sistemas	41
3.1 Sistemas dinâmicos e processo de modelagem	41
3.2 Diagramas de causa-efeito	42
3.3 Diagramas de estoques e fluxos	43
3.4 Estruturas e comportamentos dos sistemas dinâmicos	46
3.4.1 Comportamento: oscilações	47
3.5 Mercado de <i>commodity</i> agrícola: cadeia de suprimentos e a origem das oscilações	49
3.5.1 Estrutura de gerenciamento de estoques	49

3.5.2	Estrutura genérica dos mercados de <i>commodity</i>	51
4	Modelagem qualitativa do mercado do café utilizando dinâmica de sistemas (SD)	53
4.1	Hipóteses dinâmicas e modos referenciados: suprimentos.....	54
4.2	Hipóteses dinâmicas e modos referenciados: demandas.....	57
5	Modelagem quantitativa do mercado de café utilizando equações diferenciais	61
5.1	Capacidade de produção.....	63
5.1.1	Taxa de plantio de árvores de café.....	64
5.1.2	Estoque de árvores em fase de crescimento.....	67
5.1.3	Estoque de árvores com produtividade crescente.....	68
5.1.4	Estoque de árvores com produtividade em declínio.....	69
5.1.5	Estoque de árvores em processo de regeneração.....	70
5.1.6	Estoque de árvores não-produtivas.....	70
5.1.7	Modelo matemático completo dos estoques de árvores.....	71
5.1.8	Produtividade das árvores de café.....	73
5.1.9	Capacidade total de produção.....	74
5.2	Produção e estoques brutos de café verde.....	75
5.3	Consumos e exportações.....	77
5.3.1	Torrefadoras e consumo doméstico.....	78
5.3.2	Exportadores de café.....	79
6	Ajuste paramétrico do modelo quantitativo e simulações	84
6.1	Ajuste paramétrico do modelo com dados históricos (1965-2015).....	84
6.2	Simulação de estimação entre 2013 e 2019 (sem efeitos climáticos).....	92
6.3	Simulação de estimação entre 2016 e 2019 (com efeitos climáticos).....	95
7	Conclusões	97
7.1	Limitações do modelo.....	98
7.2	Trabalhos futuros.....	99
	Referências Bibliográficas	101
A	Definições	105
A.1	Dados e informações complementares.....	105
B	Dados estatísticos	108

B.1	Dados estatísticos e correlações.....	108
C	Códigos implementados	111
C.1	Códigos iThink/Stella do Capítulo 3.....	111
C.2	Códigos iThink/Stella do Capítulo 5.....	111

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Relação entre as principais variáveis do mercado do café e dos preços (curva contínua) (ICO Composite Price Indicator) entre 1964 e 2013. Fonte: ICO, 2014 [23].	3
Figura 1.2 – Diagrama das relações entre os principais agentes do mercado do café. Fonte: Autor, 2016.	4
Figura 1.3 – Cotação diária do Preços do Café Arábica pelo Indicador CEPEA/ESALQ/USP. Fonte: CNC, 2016 [10].	7
Figura 2.1 – Evolução dos estoques de árvores produtivas, em formação e dos preços médios anuais pagos aos produtores brasileiros (PPP ICO) entre 1960 e 2015. Fonte: Autor (2016), Lewin et al. [28], Conab [11], Barros [4] e Barros (Adaptado) [5].	13
Figura 2.2 - Evolução da produção de café no Brasil e dos preços pagos aos produtores brasileiros. Fonte: Autor, 2016, ICO [25], Conab [13] e Lewin et al. (Adaptado) [28].	13
Figura 2.3 – Taxa de consumo de café anual do Brasil (Consumo Doméstico) e dos Países Importadores (Disappearance) entre 1990 e 2015. Fonte: ICO [25] e Abic (2015) (adaptado).	14
Figura 2.4 – Gráfico dos Estoques de café verde nos países produtores, nos países importadores e no Brasil comparados com os preços do Indicador ICO entre 1990 e 2015. Fonte: ICO et al. (2014) (adaptado) [25].	16
Figura 2.5 – Evolução da produtividade média de uma árvore de café de acordo com a idade na década de 1970, segundo Laignelet (1976), e de acordo com a produtividade média dos últimos 55 anos. Fonte: Autor (2016) e Laignelet (Adaptado) [27].	19
Figura 2.6 - Evolução da produtividade de café no Brasil entre 1960 e 2015.	20
Figura 2.7 – Cotação, custo e renda estimada do café Arábico e Robusto (A/R) para o Brasil. Fonte: Conab [13].	22
Figura 2.8 - Estimativa mensal de colheita de café do Brasil para a safra 2016 e curva de distribuição de taxas de colheita esperada. Fonte: Conab (adaptado) [13].	24
Figura 2.9 – Cotação média do Café Arábica na BM&FBovespa – Contrato com Vencimento Setembro/15 (CFEU15). Fonte: CNA [8] e Bovespa [6].	25
Figura 2.10 – Média das cotações mensais dos preços do café arábico – indicador CEPEA/ESALQ/USP, considerando a inflação entre o período de 2000 a 2015, e média das cotações dos contratos futuros (CFEU15) ([6] e [7]).	25
Figura 2.11 – Variação dos Preços do café em função da disponibilidade traçada pela colheita. Fonte: Deaton e Laroque [16].	26
Figura 2.12 – Taxa de recebimento mensal e níveis de estoques de sacas de café nas cooperativas brasileiras. Fonte: DECAF [17].	28
Figura 2.13 – Exportações, importações e reexportações de café comparado com o indicador ICO desde 1990. Fonte: ICO ([22] e [23]).	29

Figura 2.14 – Exportação e produção exportável brasileira comparada com o indicador ICO desde 1990. Fonte: ICO ([22] e [23]).	30
Figura 2.15 – Volume médio mensal exportado pelo Brasil entre 2001 e 2016. Fonte: Conab [13].	31
Figura 2.16 – Volume de café exportado pelo Brasil descontado a tendência exponencial entre 1990 e 2014. Fonte: Autor (2016) e Conab [13].	31
Figura 2.17 – Evolução das densidades de árvores em formação e produtivas por hectare no Brasil entre 2002 e 2013. Fonte: Conab et al. [11] e USDA [44].	36
Figura 2.18 – Relação de suprimento e demanda para o mercado mundial de café ([22] e [23]).	37
Figura 2.19 – Relação de suprimento e demanda (Exportação + Consumo Doméstico) para o mercado do café brasileiro ([22] e [23]).	38
Figura 2.20 – Balanço anual do suprimento e das demandas de café do Brasil.	39
Figura 3.1 – Diagrama de ciclo causal do mercado do café mundial baseado na análise de gráficos e de outros dados do mercado. Fonte: Autor (2016).	43
Figura 3.2 – SFD para um possível cenário descrito para o mercado do café mundial.	45
Figura 3.3 – Gráfico dos resultados dos estoques (a) e das produções (b) para o cenário idealizado descrito na seção 3.3 de SFD para um horizonte de 50 anos. Fonte: Autor (2016).	46
Figura 3.4 – Comportamentos básicos das estruturas. Fonte: Sterman [42].	47
Figura 3.5 – CLD representativa da estrutura capaz de gerar comportamento oscilatório.	48
Figura 3.6 – Estrutura genérica dos mercados de commodity. Fonte: Sterman [42].	51
Figura 4.1 – CLD criado a partir das hipóteses dinâmicas envolvendo a produção e a formação de preços do café.	55
Figura 4.2 – CLD criado a partir das hipóteses dinâmicas envolvendo as demandas e a formação de preços do café.	58
Figura 5.1 – Gráfico comparativo de taxas de plantio de árvores de café para diferentes valores de parâmetros da função logística. Fonte: Autor (2016).	66
Figura 5.2 – <i>Boxplot</i> para os preços pagos aos produtores entre (a) 1965 e 1989, e entre (b) 1990 e 2015.	66
Figura 5.3 – Modelo matemático computacional completo para os estoques de árvores de café elaborado em <i>iThink/Stella</i> .	72
Figura 5.4 – Modelo matemático computacional completo para as produtividades das árvores de café implementado em <i>iThink/Stella</i> .	75
Figura 5.5 - Modelo matemático computacional completo para a produção e estocagem bruta de café elaborado em <i>iThink/Stella</i> .	78
Figura 5.6 - Modelo matemático computacional para a demanda do consumo doméstico brasileiro de café elaborado em <i>iThink/Stella</i> .	79
Figura 5.7 - Modelo matemático computacional para a demanda de exportação de café elaborado em <i>iThink/Stella</i> .	80

Figura 6.1 – Resultados de simulação de ajuste dos estoques de árvores produtivas (a) e erro absoluto (b).	86
Figura 6.2 – Resultados de simulação de ajuste dos estoques de árvores em formação (a) e erro absoluto (b).	87
Figura 6.3 – Resultados de simulação de ajuste das taxas de produção anual (a) e erro absoluto (b).	88
Figura 6.4 – Resultados de simulação de calibração das taxas de exportação anual (a) e erro absoluto (b).	89
Figura 6.5 – Resultados de simulação de ajuste dos estoques de passagem (a) e erro absoluto (b).	90
Figura 6.6 – Balanço de produção simulado entre 1990 e 2016.	91
Figura 6.7 – Relação entre os estoques e demandas simulada entre 1990 e 2016.	91
Figura 6.8 – Relação entre as produções e demandas simulada entre 1990 e 2016.	92
Figura 6.9 – Valores mensais simulados de variáveis selecionadas entre jan/15 e jul/16.	92
Figura 6.10 – Estimativa de preços (Indicador ICO) para análises sugeridas.	93
Figura 6.11 – Resultados obtidos para os estoques de árvores para as análises sem efeitos as secas de 2013-2015.	93
Figura 6.12 – Resultados para as principais variáveis da cadeia de produção do café para as análises sem efeitos das secas de 2013-2015.	94
Figura 6.13 - Resultados para as relações suprimento e demanda para as análises sem efeitos das secas de 2013-2015.	95
Figura 6.14 - Resultados para as principais variáveis da cadeia de produção do café para as análises com estimativas de preços entre 2016 e 2019.	95
Figura 6.15 - Resultados para as relações suprimento e demanda para as análises com estimativas de preços entre 2016 e 2019.	96
Figura A.1 – Descrição gráfica da função <i>DELAY3()</i> do software <i>Ithink/Stella</i> [26].	107

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 - Nomenclatura das Variáveis	62
Tabela 6.1 – Análise de erros dos resultados das simulações parciais de ajustes com dados históricos.....	90
Tabela B.1: Correlações estatísticas entre os estoques de árvores em formação e os principais indicadores de preços, custo e lucro.....	108
Tabela B.2: Correlações estatísticas entre os índices de produtividade anuais e os principais indicadores de preços, custo e lucro.....	109
Tabela B.3: Correlações estatísticas entre os níveis de estoques de café verde no Brasil e os principais indicadores de preços, custo e lucro.....	110
Tabela B.4: Correlações estatísticas entre o indicador de preços do café arábico CEPEA/ESALQ/USP e as cotações dos contratos futuros do café arábico com vencimento em setembro/15 (CFEU15).....	110

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta brevemente os conceitos e características do mercado do *commodity*¹ do café, citando os principais modelos dinâmicos desenvolvidos e as principais críticas. O principal modelo de referência foi desenvolvido em 1976 por Laignelet [27], onde foi abordado um Sistema Dinâmico (SD) extremamente amplo, implementado no *software DYNAMO (DYNAmic MOdels)*² e aplicado para o mercado mundial do café. Entretanto, como motivação deste trabalho, é desejado implementar um modelo dinâmico para a economia cafeeira brasileira para investigar seu comportamento e é necessário considerar as mudanças estruturais ocorridas nos últimos 50 anos, além do principal fator gerador de distúrbios: os impactos das alterações climáticas ([22] e [23]).

O mercado do café brasileiro e mundial sugere ser um sistema dinâmico multivariado estocástico com importantes não-linearidades e realimentações de balanço com atrasos significativos. Tal sistema pode criar instabilidades e pode aumentar a tendência de oscilar suas variáveis ([36] e [42]). Por exemplo, em determinados sistemas, realimentações positivas guiam trajetórias de estados de pontos de equilíbrio instáveis para pontos distantes, porém podem ser limitadas por não-lineares e realimentações negativas sem ou com atrasos, que são localmente estáveis. Assim, o sistema pode ser globalmente estável e seus estados podem ficar retidos em uma órbita fechada do espaço de estados, caracterizando os ciclos limites e oscilações caóticas ([38], [39] e [42]). Este comportamento explicaria os ciclos de prosperidade e quebra do mercado do café ([18] e [27]). Muitos autores abordam este tema

¹ A palavra *commodity* vem do inglês e, originalmente, tem significado de mercadoria. No entanto, hoje o termo é utilizado para definir produtos de grande importância para a economia e que, normalmente, são produzidos em escala. *Commodities* funcionam como matéria-prima e são produtos não diferenciáveis assim como o petróleo, boi gordo, soja, ouro e o café. O *commodity* café é constantemente tratado como café verde para diferenciação do café torrado e moído ou solúvel. A unidade de mercadoria é a saca de 60 quilogramas. Os preços físicos, ou preços à vista ou, simplesmente, preços do café são definidos diariamente em bolsas de valores, cotados em centavos de dólar americano por libra (USCents/lb).

² O *Software DYNAMO* foi desenvolvido em meados de 1950 inicialmente sob a direção de Jay Wright Forrester. O *Software* é definido como uma linguagem de simulação e notação gráfica, implementado em um *framework* analítico de sistemas dinâmicos.

por envolver *commodities*, sistemas dinâmicos realimentados com variáveis em atraso e instabilidades ([20], [29], [19], [36] e [18]).

O mercado de energia elétrica na América do Sul, inclusive o Brasil, e a indústria aérea norte americana podem ter uma dinâmica de mercado, controle de estoques, capacidade de aquisição e outros recursos com as mesmas características do mercado do café, principalmente quanto à evolução da capacidade instalada de produção. Arango ([1] e [2]) usa os conceitos de sistemas dinâmicos para provar que o comportamento do mercado de energia é endógeno, verificando que, sob certas circunstâncias, os preços médios estão próximos do equilíbrio de Cournot Nash e com um viés para competitividade. Para a indústria aérea norte americana, Pierson e Sterman [36] demonstram que ainda existe controvérsias quanto as causas de oscilações de mercado, mas estipulam um modelo dinâmico consistente e ajustado com dados históricos. A possível situação de equilíbrio relatada por Arango [2] é a desejada para o mercado do café. Entretanto, com inserção de atrasos de investimentos em ambos mercados, surgiram evidências e tendências de oscilações.

1.1 Motivação e breve revisão bibliográfica

Os mercados de *commodities*, especialmente de produtos agrícolas, tendem a oscilar em resposta a choques diversos. As forças de mercado podem agir para amplificar ou atenuar estas oscilações. Muitos mercados vivem uma instabilidade crônica e cíclica em todas as suas variáveis como a capacidade de produção, produção, estoques, preços e os investimentos. A diversidade desses ciclos sugere que estes comportamentos são endógenos. Nestes mercados, a realimentação de balanço, na qual os preços buscam equilibrar o suprimento e a demanda, enfrentam longos atrasos de resposta de algumas variáveis, ocasionando oscilações [42]. Uma explicação comum para estes ciclos é que a demanda é cíclica, e é evidente que a economia como um todo sobe e desce, apresentando um ciclo de negócios, e que induz movimentos nos *commodities* [42].

O mercado do café exhibe uma dinâmica cíclica forte, que perdura por muitos anos, desde 1882 pelo menos, e que parece ter tido um último gatilho mais intenso nos anos 70 ([27], [35] e [32]). O período médio dos preços, pico a pico, após 1970, gira em torno de 8 anos, as amplitudes em torno de 275 USCents/lb, variando entre 37 e 312 USCents/lb, e a média em 103 USCents/lb. Este gatilho, que afetou muito o Brasil, pode ter sido causado ou

amplificado pela influência da política de quotas de exportação, que ajudou os produtores a incorporar a informação dos preços na decisão de plantar e aumentar a produtividade [32]. Além disso, os movimentos das demandas do café não sugerem ciclos e parecem ser inertes a todas as variações de mercado, inclusive crises econômicas em muitos países produtores e consumidores, como mostra a Figura 1.1 [23].

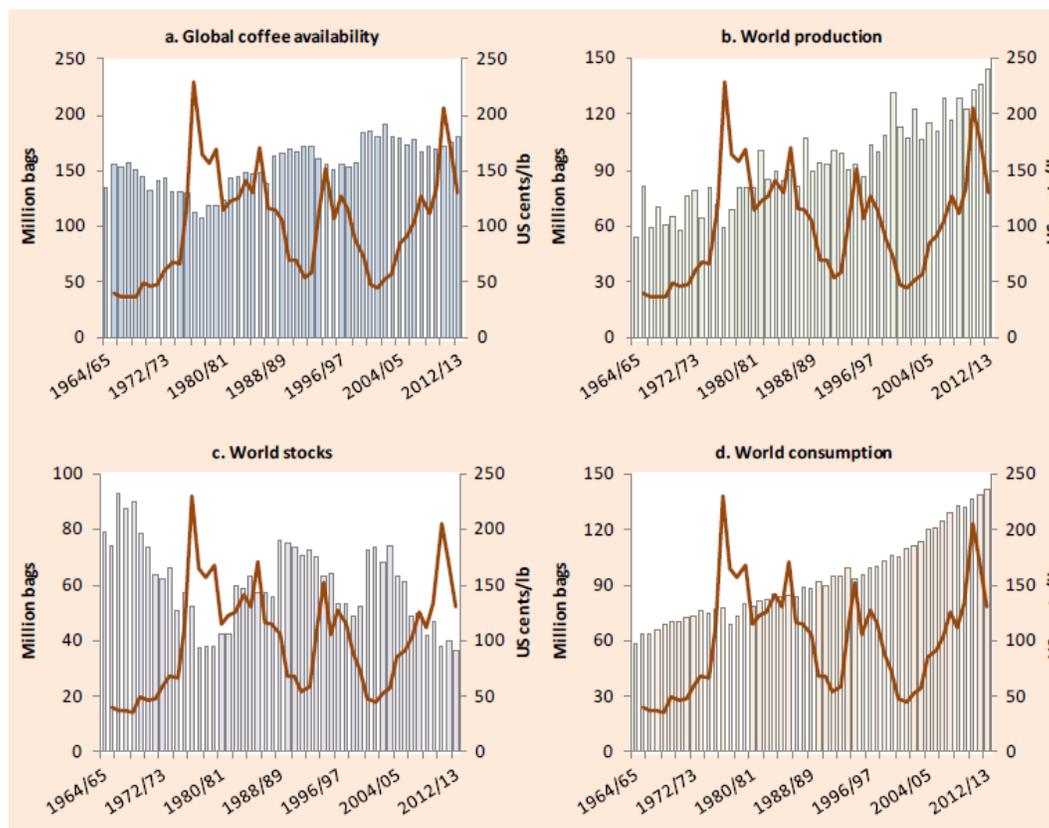


Figura 1.1 – Relação entre as principais variáveis do mercado do café e dos preços (curva contínua) (*ICO Composite Price Indicator*)³ entre 1964 e 2013. Fonte: ICO, 2014 [23].

O mercado do café pode ser dividido em dois subsistemas: Setor de negócios e distribuição e o setor de mercado futuro. Neste trabalho, o enfoque principal será no setor de negócios e distribuição, que apresenta realimentações visando o reabastecimento, à manutenção de estoques brutos e o ajuste de estoques dos exportadores, que respondem às expectativas de alterações de preços [27]. A Figura 1.2 apresenta um resumo geral das

³ O Indicador de Preços Composto ICO (*ICO Composite Price*) é um indicador diário global de preços físicos baseado nos preços dos grupos de diferentes tipos de *commodity* de café, em especial o arábico e o robusto ou conilon, que são negociados nas bolsas de valores de Nova York e Londres (veja A.1). O indicador é calculado pela *Internacional Coffee Organization* (ICO), representando um preço de mercado de café mais homogêneo e, neste trabalho, foram empregadas as médias aritméticas anuais e mensais deste indicador ([23] e [32]).

relações entre os principais agentes do mercado do café. Neste diagrama são identificados os mecanismos de suprimento e de demanda (mercados consumidores) conectados pela comercialização, onde encontramos as formações de preços (internacionais e locais) e negociações de mercadorias futuras.

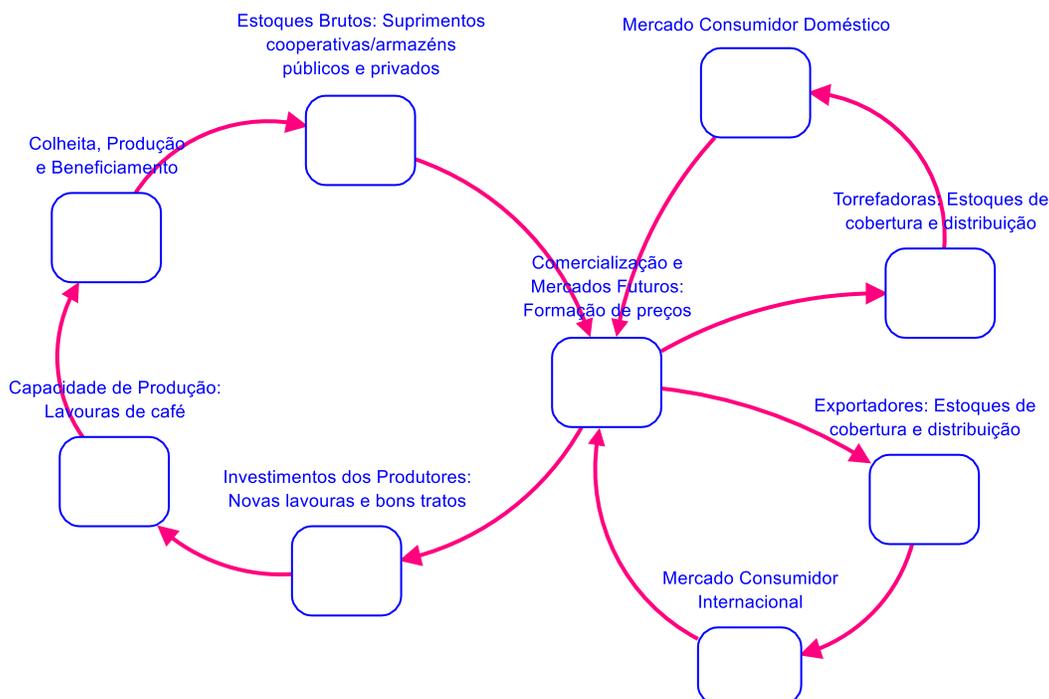


Figura 1.2 – Diagrama das relações entre os principais agentes do mercado do café. Fonte: Autor, 2016.

Por volta dos anos 70, dois trabalhos importantes sobre *commodities*, com emprego de conceitos de SD, foram publicados. “*The Dynamics of the World Cocoa Market*” de F. H. Weymar (1968) apresentou um modelo conceitual estrutural realimentado que descreveu a operação de distribuição e negócios da indústria do cacau, e aplicou procedimentos econométricos para identificar os parâmetros e as relações entre estoques e preços [27]. “*The Dynamic of Commodity Production Cycles: A Dynamic Cobweb Theorem*” de D. L. Meadows (1970) descreveu um modelo geral genérico de *commodities* para o comportamento entre produtores e consumidores em um mercado competitivo [31]. O modelo de Meadows é uma das referências mais utilizadas até a atualidade.

Em 1976, Laignelet [27] evidenciou os ciclos de movimento das diversas variáveis do mercado do café com dados históricos de 1825 a 1973. Seu trabalho evidenciou também que o modelo geral de Meadows [31] precisava ser redefinido para atender à modelagem do *commodity* do café, que possuía estruturas e relações não contempladas pelo modelo geral.

Os preços do café são função dos níveis dos estoques mundiais, da variação dos estoques mundiais, da produção mundial, da demanda mundial e, em 1976, também eram função das políticas de quotas aplicadas aos produtores. Laignelet ainda argumenta que a competição não era perfeita porque os pequenos países produtores não possuíam meios de estocagem, mas, atualmente, as cooperativas de produtores eliminam esta restrição, inclusive no Brasil. Para Laignelet, a necessidade de modelagem da capacidade obsoleta (árvores com mais de 40 anos de idade) também é importante. Por último, Meadows não considerava a mão-de-obra para a produção, outro fator importante no mercado do café, e que tem mudado recentemente com a inserção de mais mecanização do campo ([23] e [28]).

Laignelet [27] começou seu trabalho realizando um periodograma e uma regressão harmônica dos preços para melhor identificar os diferentes ciclos de mercado. A partir da identificação dos principais ciclos, Laignelet gerou seus principais diagramas de causalidade, analisando suas particularidades. Seu modelo, que foi gerado a partir dos modelos de Meadows (1970) e Weymar (1968), foi capaz de simular um comportamento similar ao mercado real para longos horizontes. Além disso, o modelo acopla os dois setores principais do mercado. Em seu trabalho, foi apontada uma série de fatores geradores de incertezas e que são capazes de gerar oscilações das principais variáveis.

Segundo Laignelet [27], as principais fontes de oscilações e instabilidades estão no setor de mercado futuro, onde atuam os especuladores e os *hedgers*⁴ de mercado. Entretanto, sua conclusão foi que o comportamento instável, principalmente nos preços, tem origem interna e estrutural.

Em 2009, Osorio e Arango [35] propuseram um modelo dinâmico para o mercado mundial do café com foco nas oscilações dos preços e na estrutura interna do sistema. O modelo é baseado nos trabalhos de Meadows [31] e Deaton e Laroque [16]. O modelo trabalhado não foi completamente ajustado e foram relatadas dificuldades para estimar funções de investimento. Em sua discussão, é abordado a dificuldade em compreender e

⁴ Um *hedger* é um agente de mercado que assume uma posição de investimento destinado a compensar eventuais perdas ou ganhos, que podem ser efetuadas por um investimento extra. Em linguagem simples, um *hedge* é usado para reduzir eventuais perdas substanciais ou ganhos sofridos por um indivíduo ou uma organização. Um exemplo de *hedge* é um contrato futuro negociado em bolsa de valores. Para o produtor de café, o *hedge* é um instrumento que trava o preço para proteger a produção contra possíveis variações adversas do câmbio, por exemplo.

definir as regras de decisão de investimento dos produtores de café, além de relatar que os mercados de *commodities* primárias ainda são pouco compreendidas.

Em 2010, Velasquez [46] desenvolveu um modelo de SD e demonstrou que a estrutura do mercado do café pode gerar oscilações endógenas, embora tenha analisado apenas o mercado colombiano e as influências dos mercados internacionais. O principal enfoque de seu trabalho foi sobre a instabilidade dos preços (oscilações) e a proposta de soluções para mitigá-la. Seu modelo é uma adaptação do modelo de mercado de *commodity* criado por Meadows [31]. Em seu estudo, são analisados alguns outros trabalhos de modelagem do café, mas, em sua maioria, são trabalhos baseados em modelos econométricos e autoregressivos [32]. Velasquez relata estudos de outros autores sobre outras *commodities*, onde foram empregados conceitos de SD, mas não foi relatado o trabalho sobre o café de Laignelet [27]. O modelo desenvolvido foi implementado no *software iThink* [26].

Velasques [46], em seu modelo dinâmico, tratou de um conjunto de restrições aplicados pelos trabalhos descritos anteriormente, mas impôs uma série de outras restrições importantes em seu modelo, tais como não avaliar os efeitos climáticos e supor uma produtividade constante para as árvores de café. Além disso, para o café colombiano, não existem muitos dados históricos disponíveis ([46] e [35]).

Atualmente, o mercado mundial do café tem enfrentado desafios antigos e novos, surgidos nos últimos anos, tais como alterações climáticas mais severas, falta de gerência de riscos devido à grande volatilidade⁵ de preços, crescimento dos custos no setor produtivo, desenvolvimento do consumo mundial e a sustentabilidade do setor, em particular, em seus três pilares: econômico, social e ambiental como enfatizado pela *Internacional Coffee Agreement (ICA 2007)*⁶ ([22] e [23]). O desafio mais significativo para a cafeicultura, segundo autores da área, para a sustentabilidade da produção e do mercado, é o impacto das alterações climáticas [23]. Houve setores que se beneficiaram desde a liberação de mercado em 1990, mas os principais desafios ficaram para os países produtores e para os pequenos produtores, expostos à volatilidade e aos aumentos dos custos de produção [22].

⁵ Volatilidade é uma medida de dispersão dos retornos de um título ou índice de mercado, sendo, portanto, uma medida de risco. Para ativos, como o café, a volatilidade é calculada através do desvio-padrão histórico dos retornos logarítmicos no período considerado [23].

⁶ ICA 2007, é um tratado internacional firmado em 2007 entre nações produtoras e consumidoras, que objetiva valorizar e reforçar a economia mundial do café.

Todos os diferentes indicadores de preços de café, nacionais e internacionais, possuem uma correlação estatística muito forte, tendenciando à +1. Contudo, em 2014, o Brasil apresentou sinais de crise financeira, que se agravaram em 2015 e 2016. Tal cenário trouxe flutuações no câmbio (com tendência de desvalorização do real), aumento de inflação (chegando a mais de 10% em 2015), e aumento da taxa de juros básica, a SELIC. O cenário de crise sugere que os preços cotados no Brasil se “desacoplem” dos preços internacionais, distanciando a realidade dos produtores brasileiros dos demais produtores mundiais como mostra da Figura 1.3.

Cenário idêntico é encontrado nas mediações de 2002, quando o Brasil também passou por crise, ainda que de menores proporções, embora tenha registrado inflação de 12,53% ([3] e [7]).

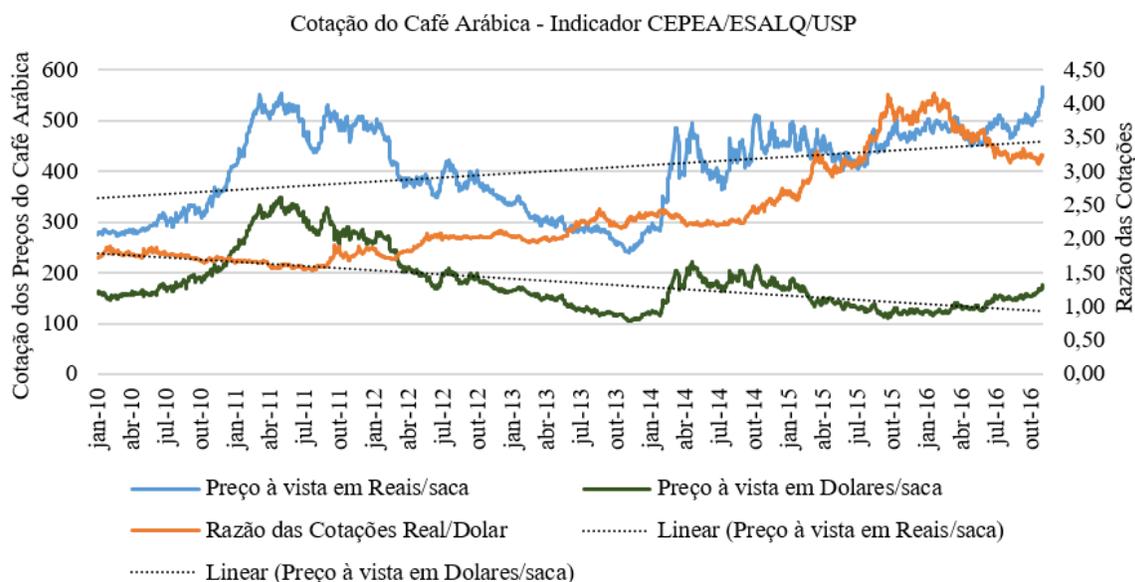


Figura 1.3 – Cotação diária dos preços do Café Arábica pelo Indicador CEPEA/ESALQ/USP. Fonte: CNC, 2016 [10].

Políticas e estratégias, que visavam evitar oscilações e garantir estabilidade de preços, implementadas no passado, não surtiram os efeitos desejados. Como, por exemplo, foi a política de regulação de mercado por quotas de exportação dos anos 70 aos 90 [23]. A política de quotas de exportação, inclusive, pode ter surtido efeitos contrários, distanciando os preços de atacado e varejo dos preços pagos aos produtores, prejudicando os países produtores e beneficiando as torrefadoras e varejistas [32]. A política dos preços mínimos, que visa socorrer os produtores em tempos de preços baixos, já na era de mercado livre, pós anos 1990, também não se mostra eficiente.

As soluções propostas para amenizar todos estes problemas tais como: o uso de contratos futuros, a termo, e de opção (veja [A.1](#)); os investimentos em cafés certificados e especiais; cuidados com o meio ambiente; apostas na prosperidade econômica e no consumo de mercados emergentes (como a China, que também tem produzido o café arábico); são certamente ações positivas, mas são ações cujo os efeitos não estão totalmente claros [\[22\]](#). Apesar da observação das características de suprimento, demanda e preços pelo mercado, da compreensão de haver ações visando balanço entre a demanda e o suprimento com a boa remuneração dos produtores, os agentes do setor parecem não considerar todos os efeitos dinâmicos, podendo as soluções propostas não serem efetivas também. A falta da correta percepção das dinâmicas, dos atrasos, das não-linearidades e das realimentações podem persistir no mercado do café ([\[32\]](#), [\[40\]](#) e [\[41\]](#)).

Nesta dissertação, argumenta-se que os modelos dinâmicos criados até o presente não tiveram uma aplicação prática concreta, não sendo ajustados e servindo apenas como fontes de informação qualitativa. Percebe-se que a necessidade do melhor entendimento da dinâmica está mais aparente no contexto da situação econômica, alimentar e ambiental mundial ([\[32\]](#), [\[40\]](#) e [\[41\]](#)). Os efeitos da atual situação e das soluções propostas não são conhecidos, mas existem indícios que estamos caminhando para novas superproduções, excedentes e queda de preços em níveis mundiais. Os tomadores de decisões, governos, gerentes de fundos financeiros para o setor, e, principalmente, os pequenos produtores e suas cooperativas necessitam de ferramentas que possam dar suporte à atuação no mercado.

Neste contexto, esta dissertação propõe um modelo dinâmico da cadeia de suprimentos do mercado do café brasileiro, efetuando o ajuste para o cenário nacional, permitindo que novos subsistemas sejam implementados no futuro, que possam ser acopladas necessidades específicas dos agentes envolvidos, permitindo que variáveis sejam estimadas para horizontes maiores que um ano (produções de café são estimadas anualmente pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab)) e permitindo que cenários diferentes sejam analisados. Tal modelo dinâmico será uma ferramenta de gerenciamento de riscos do setor.

Para modelar a dinâmica, serão aplicados os conceitos de SD. Trata-se de uma metodologia de modelagem e simulação computacional para o enquadramento, a compreensão e a discussão de questões complexas segundo o proponente, professor J. W. Forrester do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). A abordagem de SD tem se

tornado bastante utilizada nas *Business Schools* pelo mundo [14]. Como exemplos de livros texto nesta área, podem ser citados *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World* de J. Sterman [42] e *Dynamic Modeling for Business Management - An Introduction* de McGarvey e Hannon [30].

Também serão utilizados dados históricos e séries temporais do mercado do café, colhidos nas principais instituições do setor como a Organização Internacional do Café (*International Coffee Organization (ICO)*) [25] e a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) [13]. Além disso, análises conjunturais de mercado do Conselho Nacional do Café (CNC) [10] e do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – Esalq/USP [7] são estudados. É importante salientar que todas estas instituições, conjuntamente com outras do setor agrícola do Brasil, não atuam nos mercados do café como agências reguladoras impondo restrições de cultivo, produção, estocagem, comercialização, consumo e exportação. O modelo dinâmico proposto é implementado no *software iThink/Stella* [26] e são empregados outros recursos de *softwares* como o *MS Excel*, *Vensim* [47] e *Matlab*.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um modelo dinâmico para a cadeia de suprimentos do mercado do *commodity* do café brasileiro, focado no setor de distribuição e negócios, como definido por Laignelet [27], e realizar o ajuste do modelo para análise de cenários futuros. Os seguintes itens detalham os objetivos desta dissertação:

- Apresentar um estudo detalhado do mercado do café, mostrando as principais características.
- Apresentar um conjunto de hipóteses dinâmicas, modos de referência e diagramas de ciclo causal, baseados nos estudos do mercado e nos trabalhos de modelagem de autores antecedentes.
- Apresentar um modelo dinâmico computacional da cadeia de suprimentos do café brasileiro implementado no *software iThink/Stella*, realizar simulações, ajustes, e análises de prováveis cenários futuros.

1.3 Estrutura

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No capítulo 2, é abordado a descrição do mercado do café, além de um breve resumo histórico dos últimos 50 anos;
- No capítulo 3, são introduzidos e revisados os conceitos de SD aplicados para o mercado do café;
- No capítulo 4, são identificadas as hipóteses dinâmicas, modos de referência, e os diagramas de ciclo causal;
- No capítulo 5, é descrito o modelo dinâmico matemático e computacional desenvolvido;
- No capítulo 6, são apresentados as simulações e ajustes realizados;
- O capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Neste capítulo, vimos uma breve revisão bibliográfica com a introdução dos aspectos do mercado do café que sugerem um sistema dinâmico, que é capaz de gerar oscilações em suas variáveis. Vimos os principais autores: Meadows [31], Laignelet [27], Velasquez [46], Arango e Osorio [35]; seus modelos dinâmicos para *commodities* e os seus pontos fracos, que motivam a proposta de desenvolver um modelo dinâmico ajustado para o café do Brasil. É observado que a obra de Laignelet (1976) apresenta uma rica quantidade de informações, que foram consideradas. Por fim, foram apresentadas as metodologias e materiais que serão empregados, além das fontes de informações e dados.

Capítulo 2

Descrição do mercado do café

As preocupações em entender as condições estruturais e as possibilidades de equilíbrio dos preços do café são antigas e, mais recentemente, estão registradas no ICA 2007. Na teoria econômica, os preços são função do equilíbrio das transações físicas. Sem estoques, o equilíbrio é dado quando a quantidade ofertada é igual a demandada [49]. A princípio, as interações, ajustes de preços e quantidades ocorrem sempre com tendência ao equilíbrio estável. No caso de *commodities* agrícolas, a situação é diferente. Existe uma dinâmica complexa: os preços do café sofrem influências dos mercados futuros e são determinados pelos desequilíbrios dos estoques mundiais, da produção mundial e do consumo mundial. Outros fatores como alterações climáticas, flutuações de câmbio e flutuações de outros *commodities* podem se sobrepor às influências de suprimento e demanda e podem alterar os preços ([22] e [42]).

Segundo o ICO [25], o equilíbrio do mercado do café é definido como havendo um preço que cubra os custos dos produtores mais eficientes e mantenha um estreito desvio entre suprimento e demanda, prevenindo desequilíbrios de longo prazo que possam gerar volatilidades, conforme descrição dada por Arango [2]. Ainda de acordo com o ICO, a sustentabilidade do setor se refere à situação na qual os preços cubram os custos mínimos de produção e permitam aos produtores a manutenção de suas atividades [25].

A cadeia de produção de café pode ser dividida entre os países produtores, que consomem e exportam seus excedentes de café verde, países importadores, que consomem e reexportam seus excedentes e produtos beneficiados, e os países somente consumidores. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de *commodity* café verde e permanece nesta posição por vários anos seguidos desde o começo do século XX, chegando a produzir entre três e quatro vezes mais que o segundo maior produtor [28]. O Brasil é o segundo maior consumidor, perdendo apenas para os Estados Unidos ([32] e [23]).

2.1 Histórico do mercado

Não foram encontrados muitos dados sobre a capacidade de produção de café dos países produtores, exceto o Brasil. Velasquez [46], em seu trabalho, relata a falta de dados históricos apropriados importantes, que são um entrave à formulação de equações e simulações [46]. Os dados e informações tratados nesta dissertação foram disponibilizados pelo ICO, USDA⁷, MAPA⁸, Conab, Abic⁹, CNC e Esalq/USP entre outros.

Entre 1965 e 1989, o mercado foi regulado por uma série de acordos internacionais, *International Coffee Agreements* (ICA), que visavam à gerência entre o suprimento e a demanda e visavam à manutenção dos preços estáveis mediante cotas de exportação, que foram impostas aos países exportadores. Esses acordos falharam [32]. Desde 1990, as forças de mercado estão livres para determinar o caminho da cafeicultura [23].

Quanto à capacidade de produção, a Figura 2.1 descreve a evolução dos estoques de árvores produtivas e em formação¹⁰ no Brasil desde 1960 até o presente.

Entre 1960 e 1969, foram eliminadas cerca de 2 bilhões de árvores, provavelmente árvores já improdutivas por idade, justamente quando os preços estavam baixos e os estoques mundiais de café verde estavam altos, conforme mostra a Figura 1.1. Embora não haja informação clara da razão da eliminação [27]. Neste período, também é registrado um estoque de árvores em formação bem baixo, apontando o desestímulo em plantar. A produção mundial seguiu uma média constante e a brasileira tendenciou à queda, conforme a Figura 2.2. Observando um consumo mundial e brasileiro crescente (segundo tendência e dados esparsos disponíveis) como mostra a Figura 1.1 e Figura 2.3, os estoques mundiais de café verde diminuíram, chegando aos seus menores níveis em 1977 e permanecendo por mais dois anos em 40 milhões de sacas. Não foram encontrados dados dos estoques brasileiros para este período, mas existe boa probabilidade de terem seguido as tendências mundiais.

⁷ United States Department of Agriculture (USDA).

⁸ Ministérios da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil.

⁹ Associação Brasileira da Indústria de Café.

¹⁰ Lavouras em formação são descritas como lavouras compostas por plantas com menos de 4 anos de idade (em média) e com exposição parcial do solo, além de plantas recém-plantadas com solo exposto. Também compõe a formação as plantas que passaram por algum tipo de poda, como o chamado “esqueletamento”, e que se encontram em processo de regeneração, devendo retornar a efetiva produção entre 1 e 4 anos [48]. Embora não haja uma definição padrão do tempo máximo de formação, com relatos de autores apontando de 3 a 5 anos, para este trabalho, foi adotado 4 anos ([27], [32] e [35]).

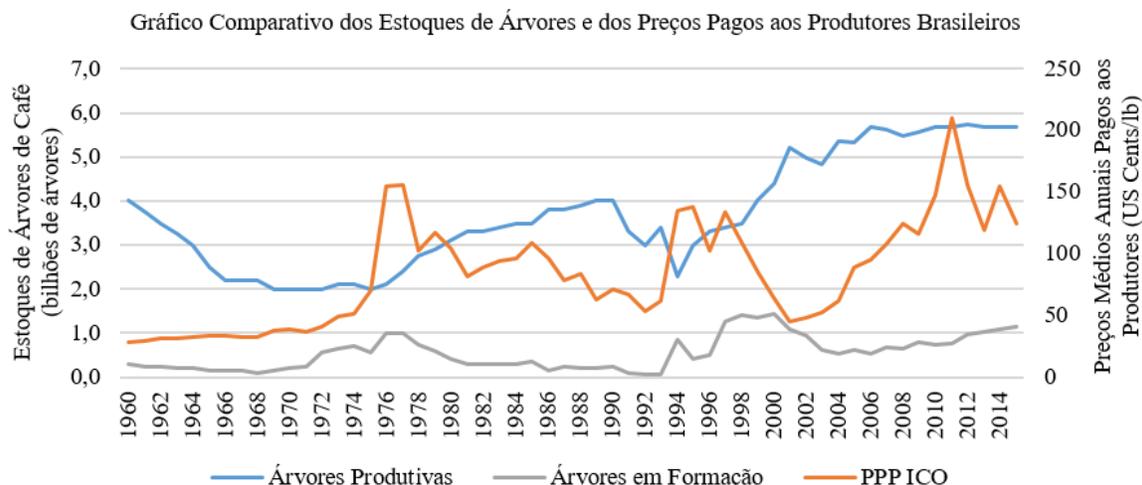


Figura 2.1 – Evolução dos estoques de árvores produtivas, em formação e dos preços médios anuais pagos aos produtores brasileiros (PPP ICO¹¹) entre 1960 e 2015. Fonte: Autor (2016), Lewin *et al.* [28], Conab [11], Barros [4] e Barros (Adaptado)¹² [5].

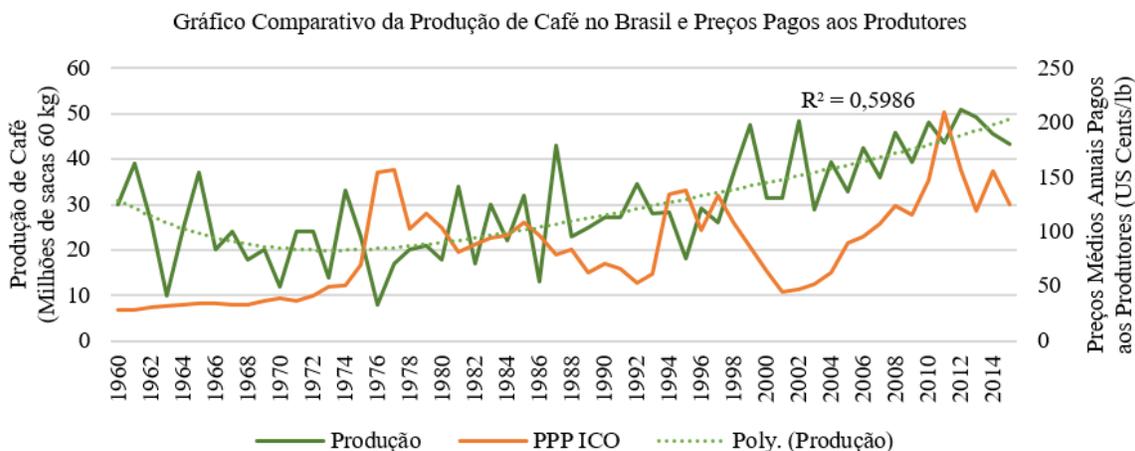


Figura 2.2 - Evolução da produção de café no Brasil e dos preços pagos aos produtores brasileiros. Fonte: Autor, 2016, ICO [25], Conab [13] e Lewin *et al.* (Adaptado) [28].

Entre 1969 e 1976, com estoques de café verde em queda até 1977, com consumo em alta e com capacidade de produção reduzida no Brasil e no mundo, os preços começam a indicar tendência em subir provavelmente motivados por temor em desabastecimento nos anos seguintes. Em 1975, foi registrado um impacto climático por geadas nas regiões cafeeiras brasileiras, que teria prejudicado a produção de café, quando o Brasil registrou

¹¹ PPP ICO significa preço médio anual pago aos produtores, que foi calculado de acordo com o indicador de preços compostos (ICO *Composite price*) disponibilizado pelo ICO [25].

¹² Muitos dos dados são de fontes diferentes e existem algumas inconsistências como entre os dados da Conab [13] e os dados publicados por Lewin *et al.* [28].

produção de 8 milhões de sacas, sem eliminar muitas árvores, e que gerou mais temor à escassez de produtos [23]. Este temor à escassez, somado à especulação de mercado, teria elevado muito os preços em 1976 e 1977.

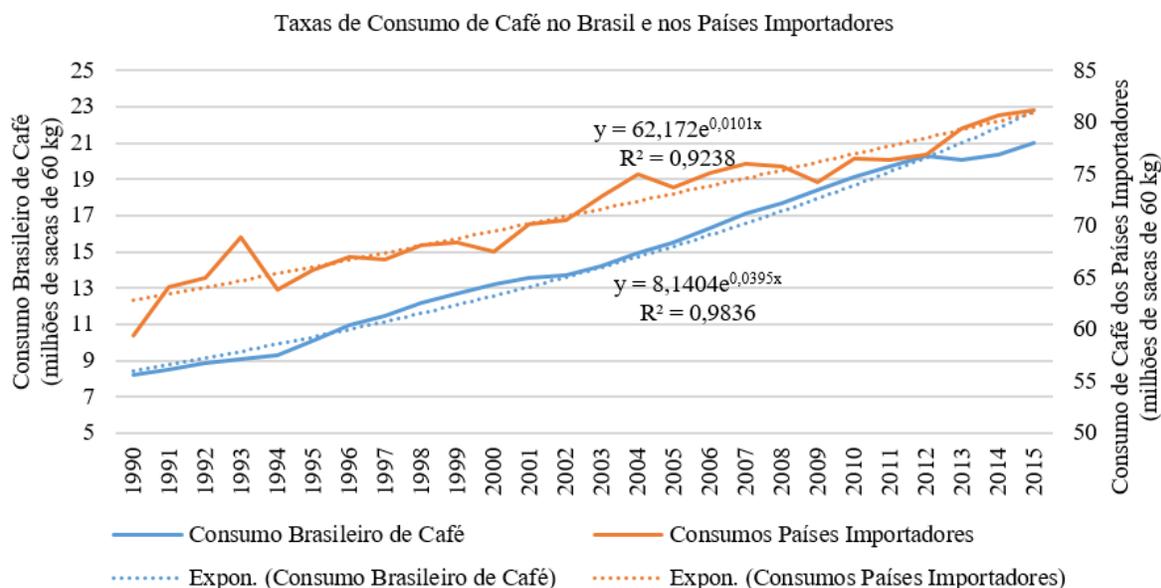


Figura 2.3 – Taxa de consumo de café anual do Brasil (Consumo Doméstico) e dos Países Importadores (*Disappearance*) entre 1990 e 2015. Fonte: ICO [25] e Abic (2015) (adaptado).

Os estoques de árvores em formação aumentam entre 1970 a 1978, motivados pelos bons preços ascendentes, sendo integrados às lavouras produtivas nos anos seguintes. Após isso, os estoques de árvores aumentam. Em 1990, o Brasil já registrava novamente um total de 4 bilhões de árvores produtivas, conforme Figura 2.1. Consequentemente, a produção de café no Brasil e no mundo aumentou na década de 70 e 80. Por sua vez, mesmo com o consumo em crescimento, no balanço, os estoques mundiais do *commodity* (provavelmente os estoques brasileiros também) vieram aumentando e indicando tendência em aumentar mais. Isto devido à conhecida falta de elasticidade do suprimento em relação a demanda, conforme a Figura 1.1 mostra, o que implica em queda de preços continuamente entre 1977 e 1994. E é neste período que os estoques de árvores em formação diminuem, seguindo a tendência de desestímulo em plantar e empregar tratamentos agrícolas.

Em 1985, foi registrado mais uma alteração climática por geadas, desta vez provavelmente não tão intensa, mas geradora de temor à escassez, quando a produção brasileira atingiu a marca de 13 milhões de sacas e, por isso, o pequeno pico de preços em 1985. Esta geada não eliminou uma quantidade grande de árvores, mas motivou uma

migração de porção das lavouras dos estados do Paraná e São Paulo para o estado de Minas Gerais, por ter terras altas e menos riscos de geadas [28]. Atualmente, Minas Gerais é o maior estado produtor. Entretanto, autores tem registrado que as secas podem causar tantos danos quanto às geadas e, por isso, os crescentes investimentos em irrigação recentemente.

Entre 1991 e 1994, os estoques mundiais estavam cheios, mantendo os preços baixos na faixa dos 60 USCents/lb. Neste período, somado ao desestímulo dos preços, houve uma sucessão de duas geadas e secas no Brasil, que efetivamente eliminou mais de 1,7 bilhões de árvores reduzindo a capacidade de produção e levando prejuízos aos produtores. Ainda neste período, como os estoques estavam altos, o mercado parece ter demorado para perceber a perda de capacidade produtiva. Os produtores ficaram desmotivados em plantar e com medo de novas geadas. Em 1994, a área em formação era praticamente nula, conforme Figura 2.1.

Então, entre 1990 e 1995, a produção brasileira caiu no geral, chegando a 18 milhões de sacas em 1994, e os estoques mundiais passaram a ser consumidos, atingindo aproximadamente 50 milhões de sacas entre 1997 e 1998. Os estoques dos países exportadores baixaram em cerca de 15 milhões de sacas, embora no Brasil tenha se mantido constante, e os estoques dos países importadores diminuíram cerca de 12 milhões de sacas como mostra a Figura 2.4. Com estoques sendo consumidos e capacidade de produção reduzida, o temor à escassez voltou, movimentos especulativos surgiram, os preços reagiram, e tivemos os picos de preços de 1995 e 1997. Estes preços bancaram parcialmente os replantios devido às geadas [23].

Entre 1994 e 2001, impulsionados pela necessidade de socorrer as lavouras das alterações climáticas e, principalmente, motivados pelos bons preços do café, os produtores investiram em sua capacidade de produção, chegando a ter 1,4 bilhões de árvores em formação em 1999 e um estoque de árvores produtivas de 5,2 bilhões de plantas em 2001, conforme a Figura 2.1 [28]. Além disso, não havia mais a política de quotas e havia mais crédito financeiro disponível para os produtores. Entretanto, em 1999, o Brasil passou por mais uma seca, capaz de influenciar a produção de café. Por isso, provavelmente, há uma anomalia nas produções de 2000 a 2002, mas, mesmo assim, foram registradas produções recordes, com 47,5 milhões de sacas em 1999 e 48,5 milhões de sacas em 2002.

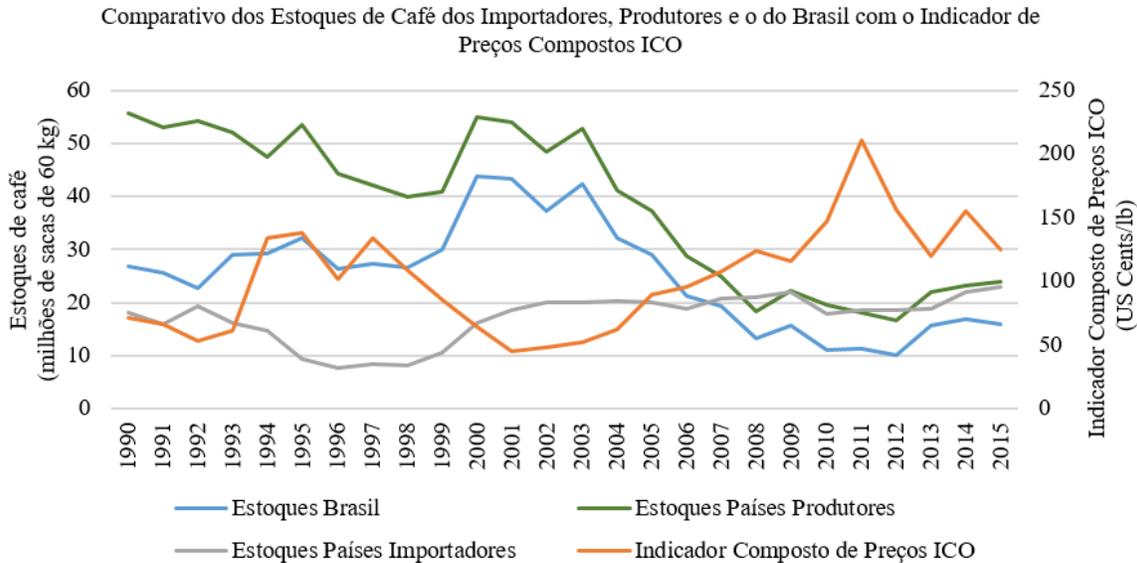


Figura 2.4 – Gráfico dos Estoques de café verde nos países produtores, nos países importadores e no Brasil comparados com os preços do Indicador ICO entre 1990 e 2015. Fonte: ICO *et al.* (2014) (adaptado) [25].

Nota: - Embora os estoques mundiais e nacionais de café tenham a capacidade de definir os preços da *commodity*, é observado uma grande dificuldade em obter informações detalhadas dos níveis dos estoques. Existem muitas informações conflitantes ou desconstruídas de diferentes fontes. Os dados de estoques disponibilizados pela ICO (*Gross Opening Stocks* ou estoques de passagem¹³) são dados e estimações de dados medidos no fim do ano safra de cada país produtor. Os dados disponibilizados pela Conab são de medições não padronizadas ao longo dos anos, encontrando-se dados coletados em março, setembro e dezembro de anos distintos. A USDA [44] também definiu medições de estoques, mas não foram encontradas informações detalhadas destas medições. - Os estoques de café no Brasil são distribuídos entre estoques públicos, privados e cooperativas de produtores ([12] e [17]).

Os bons preços entre 1994 e 1999 impulsionaram a produção mundial e, como visto, a do Brasil, levando a superproduções que carregaram os estoques novamente. Entre 2000 e 2004, os estoques mundiais estavam por volta de 70 milhões de sacas, suficiente para manter o consumo por 8 meses. A consequência foi, em termos de valores reais, os piores preços do *commodity* na história em 2001, chegando o indicador ICO a 45 US Cents/lb aproximadamente. É considerada uma das piores crises do setor e, se considerada a inflação, os piores preços em quase um século [28]. Isto trouxe grandes impactos negativos para os países produtores ([25] e [32]).

Entre 2002 e 2011, vemos o cenário reverter novamente. Os estoques de café verde dos países produtores vão sendo consumidos na medida em que o consumo mundial persiste

¹³ Estoques de passagem do Brasil são estoques normalmente registrados no mês de março por representarem o fim de um ano safra no Brasil. Tecnicamente, representa os estoques excedentes livres para exportação e consumo antes da nova safra, que seria disponibilizada primeiro ao consumo doméstico.

crescendo, principalmente nos países emergentes. Os preços reagem subindo. A capacidade de produção aumenta, onde os estoques de árvores em formação vão de 540 milhões, em 2004, a 1 bilhão em 2015. Os estoques de árvores produtivas variam entre 4,8 e 5,8 bilhões de plantas. Neste período, conseqüentemente, a produção de café aumenta não só pelo aumento das árvores produtivas, mas pelos bons tratos das lavouras (ganhos de produtividade). Entretanto, a produção não é suficiente para recompor os estoques desejados rapidamente, compensando as taxas de consumo e exportação. Durante este período, os custos de produção se mantiveram em ascensão também, principalmente fertilizantes e a atividade laboral [23].

Em 2011, temos preços altos, próximos de 200 US Cents/lb, temos estoques mundiais baixos, próximos a 40 milhões de sacas suficiente para 3 meses de consumo. O pico de preços em 2011 teve a ajuda de alterações climáticas que ocorreram na Colômbia em 2010 (terceiro maior produtor atualmente). Se observarmos os cenários, dados históricos, séries temporais e os gráficos já referenciados, parece claro que, a partir 2011, estamos em um novo ciclo de queda de preços, de nova reversão do mercado, de um novo ciclo de superprodução de café, que começa a recarregar os estoques em 2013. Aliás, a produção vem crescendo, apontando para novos recordes, como apontado pela Conab: estimativa de produção brasileira recorde de mais de 50 milhões de sacas em 2016, embora o Brasil, inclusive outros produtores, tenham passado por secas entre 2014 e 2015 [43]. O cenário de aumento de produção é previsto para a produção mundial [23].

Entretanto, existem profundas mudanças estruturais ocorridas nos últimos anos e seus efeitos não são perfeitamente conhecidos [23]. Em muitos países produtores, as terras cultiváveis estão encolhendo e os custos de produção estão subindo, sugerindo que os produtores estão em um ponto de saturação. O consumo continua próspero, embora com menor taxa de crescimento. Sem considerar a ação das secas e geadas futuras, pode haver uma dificuldade de elevar os níveis dos estoques, segurando os preços em níveis medianos e impulsionando novos investimentos [23].

2.2 Capacidade de produção

São muitos os subsistemas que integram a cadeia de capacidade de produção, mas ela pode ser definida pelos estoques de árvores, produtivas e em formação, e pelas

produtividades das plantas. A capacidade é sustentada principalmente pelos estoques de árvores de café.

O aumento (ou diminuição) da taxa de plantio é incentivado pela valorização (ou desvalorização) do *commodity*, assim como a taxa de recuperação de plantas podadas. A taxa de eliminação de plantas obsoletas segue o caminho inverso ([28] e [27]). A recuperação é aplicada às plantas que, mais comumente, estão improdutivas por idade e passam pelo processo de poda (esqueletamentos) visando a regeneração ([10] e [7]). Entretanto, a produtividade das plantas podadas não atinge aos níveis mais altos e, com um curto espaço de tempo, as plantas já estão em estágio de eliminação novamente.

Entre os principais fatores que influenciam a capacidade de produção estão os efeitos da idade das lavouras, dos desgastes devido às altas taxas de produção, dos desgastes das terras cultiváveis, das características dos solos, da qualidade e quantidade de fertilizantes utilizados, dos procedimentos e cuidados aplicados pelo produtor, das variedades de plantas cultivadas (sementes selecionadas), das densidades de plantas por área cultivada, da mecanização das lavouras, etc. Além disso, ao longo de muitos anos, são aplicadas diferentes condições ambientais nas lavouras como a variação de temperaturas, secas prolongadas, geadas no inverno, excesso ou falta de chuvas durante as floradas de setembro/outubro, tempestades com granizo e as doenças comuns da cafeicultura (broca do café e ferrugem das folhas) ([11] e [27]).

As lavouras modernas levam de 4 a 5 anos para tornarem completamente produtivas. Apesar de todos os fatores que influenciam a capacidade de produção, como apresentado anteriormente, a produtividade das árvores é bem caracterizada pela idade das plantas. Segundo Laignelet [27], o ciclo produtivo de uma árvore de café tem cerca de 36 anos, embora existam lavouras com idade bastante mais avançada. Entretanto, existem autores que relatam que a vida produtiva das lavouras modernas seja de 15 a 25 anos aproximadamente [32].

A Figura 2.5 descreve a curva de produtividade de uma árvore de café ao longo de sua vida produtiva. A produtividade média das lavouras foi apontada por Laignelet em 1976 [27]. As produtividades sem cuidados¹⁴ e com cuidados das plantas também são baseadas em

¹⁴ Cuidados remete-se ao fato dos produtores efetuarem os tratos com suas lavouras, tais como: adubação, irrigação, capina, podas periódicas entre outros procedimentos.

estudos apontados por Laignelet, entre outros. A planta que recebe cuidados pode ter uma produtividade duas vezes maior que a planta sem cuidados e os efeitos na produtividade são percebidos com um atraso de 1 a 3 anos. Após 40 anos, em média, a produtividade de uma árvore chega a um terço do pico e persiste nesta faixa, caindo mais lentamente, por alguns anos. A produtividade média das árvores na década de 70 era de 0,0036 sacas por árvore por ano ([27] e [32]).

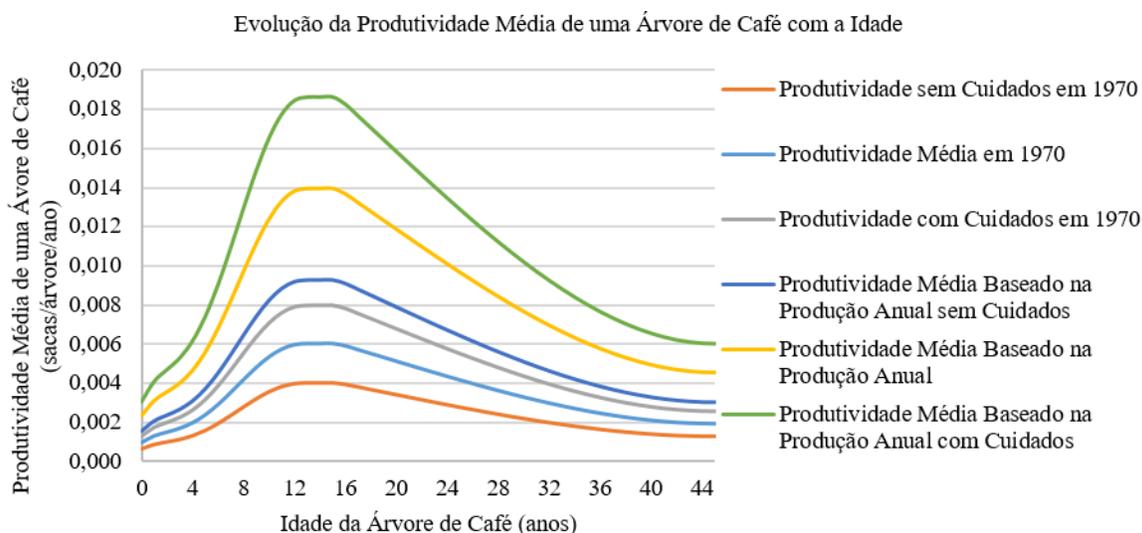


Figura 2.5 – Evolução da produtividade média de uma árvore de café de acordo com a idade na década de 1970, segundo Laignelet (1976), e de acordo com a produtividade média dos últimos 55 anos. Fonte: Autor (2016) e Laignelet (Adaptado) [27].

A Figura 2.5 mostra também a produtividade média das árvores de acordo com a idade baseado na produtividade média anual (média da razão da produção e o total de árvores produtivas), calculada para o período entre 1965 e 2015, e mantendo-se a forma da curva descrita por Laignelet em 1976. A produtividade média das árvores entre 1965 e 2015 é de 0,0083 sacas por árvore por ano, cerca de 132% maior que na década de 70.

Os cuidados dos produtores são função principalmente dos preços praticados, mas também influenciam os custos de produção, fertilizantes, disponibilidade de mão-de-obra entre outros.

O período entre 2002 e 2013 é bastante significativo porque durante este período os estoques de árvores produtivas não variaram consideravelmente, não houveram grandes alterações climáticas, os preços subiram progressivamente e os cuidados também. A produtividade e produção cresceram impulsionadas pelos preços. A produtividade média deste período é de 0,0077 sacas por árvore por ano. A maior produtividade encontrada neste

mesmo período foi de 0,0097 sacas por árvore por ano, cerca de 26 % acima da média, e a menor produtividade foi de 0,0060 sacas por árvore por ano, cerca de 22% abaixo da média.

Tomando por base as informações da Figura 2.1 e Figura 2.5, é esperado que os estoques que estavam em formação por volta de 1976 tenham entre 30 e 40 anos em 2016, descontando-se as árvores eliminadas precocemente devido às geadas e secas. Então, a princípio, é esperado uma alta taxa de formação, de regeneração das lavouras, por volta de 2006-2016.

Os efeitos dos desgastes das lavouras devido às altas taxas de produção, que causam alternâncias anuais de altas e baixas produções (alterações de alta frequência na produtividade), que são denominadas bianualidade positiva e negativa, são observados desde 1882 no Brasil [28]. Este tipo de oscilação pode ser visto na Figura 2.6 que mostra a evolução da produtividade brasileira anual (razão da produção e o total de árvores produtivas) ao longo dos anos desde 1960. É importante salientar que as produtividades das plantas aumentaram nos últimos anos, mas a produtividade das lavouras sugere uma estagnação em 2014. A explicação para este fenômeno deve se concentrar no fato de termos uma proporção de lavouras de diferentes idades. Observamos então que as lavouras antigas podem ter um peso crucial na produção anual.



Figura 2.6 - Evolução da produtividade de café no Brasil entre 1960 e 2015.

O que se percebe é uma correlação estatística expressiva entre os preços do café com os estoques de árvores em formação e dos preços com as produtividades médias das árvores, havendo algum atraso entre as suas séries temporais. Tais correlações podem ser analisadas pelos dados na Tabela B.1 e Tabela B.2 e pode ser observado que as correlações aumentam progressivamente para atrasos de 1 a 4 anos. Ainda pela Figura 2.1, é notável que os estoques de árvores em formação integram os estoques de árvores produtivas com um determinado atraso.

2.3 Produção de café e custos

Nos últimos 50 anos, como vimos, a produção mundial de café tem mostrado um crescimento constante, com alternâncias de colheitas altas e baixas, devido ao fator da bianualidade da cultura. Em alguns anos, foram registrados baixos níveis de produção devido aos impactos climáticos em alguns países produtores, como o Brasil. Mesmo durante o período de regulação de exportação, a produção registrou crescimento. A taxa de crescimento mundial médio desde 1990 é de 2% [23]. O Brasil segue o padrão de crescimento mundial, apesar de sofrer com as geadas e secas.

A produção de café cresceu consideravelmente no Vietnã desde 1980, sendo que o país produz café arábica e robusta. O Vietnã é o segundo maior produtor mundial atualmente. Outro país produtor, que apresenta crescimento no setor, é a China com seu café arábica. Entretanto, seus níveis de produção e consumo ainda são considerados muito baixos, apesar do crescimento constante [23]. A Colômbia produz o café arábica de melhor qualidade, mas é, entre os grandes produtores, o único país a não registrar crescimento expressivo de produção nos últimos anos. Isto é explicado, em parte, pela ação da doença da ferrugem da folha do café, que afetou a produção colombiana e abriu espaço para os concorrentes, que venderam mais e melhoraram a qualidade de seus cafés [23]. Mesmo assim, a Colômbia ostenta a terceira posição em produção.

Do ponto de vista de receita, não importa o destino da produção para os produtores, seja consumo doméstico ou exportação, pois eles recebem pela produção, pelo preço ao produtor (“*farm-gate price*”), assumindo a posição de tomadores de preços (“*price-takers*”). Nesta linha, ferramentas de gestão de recursos são fundamentais para redução de custos, aumento de produtividade e eliminação de atravessadores, otimizando os ganhos dos produtores. Esta solução para problemas com preços (preços baixos e volatilidades) é apresentada por muitos autores como a solução mais eficaz para os produtores [23].

O gráfico da Figura 1.1 mostra a evolução da produção anual mundial de café comparado com os preços e o gráfico da Figura 2.2 mostra a produção brasileira anual comparada com os preços. Os estudos das correlações da produção com os preços apresentam o mesmo diagnóstico conseguido para a produtividade da seção anterior, como já é de se

esperar. O aumento da produção está relacionado ao aumento da capacidade de produção através do aumento dos cuidados visando produtividade e dos estoques de árvores produtivas.

Os custos de produção sobem junto com a produção e com os preços, conforme Figura 2.7. Os custos são um grande entrave para os produtores e ameaçam o aumento e a sustentabilidade da produção. Se observarmos a Figura 2.7 podemos ver que, entre 2011 e 2013, os produtores podem ter tido margens de lucro baixas ou prejuízos, apesar das altas cotações. Os três principais componentes dos custos, em termos de valores, são: Mão-de-obra, fertilizantes e produtos fitossanitários. A mão-de-obra jovem tem se tornado cada vez mais escassa, abrindo espaço para a mecanização. Entretanto, a queda de produção em alguns países já é ligada a este problema. Os fertilizantes encareceram muito nos últimos anos, apresentando picos de aumentos nos recentes anos, como descrita pelo ICO em 2013. Os pesticidas apresentam cada vez mais riscos à saúde humana [23]. As correlações entre estas variáveis (produtividade e custos) podem ser analisadas pelos dados na Tabela B.1 e Tabela B.2.

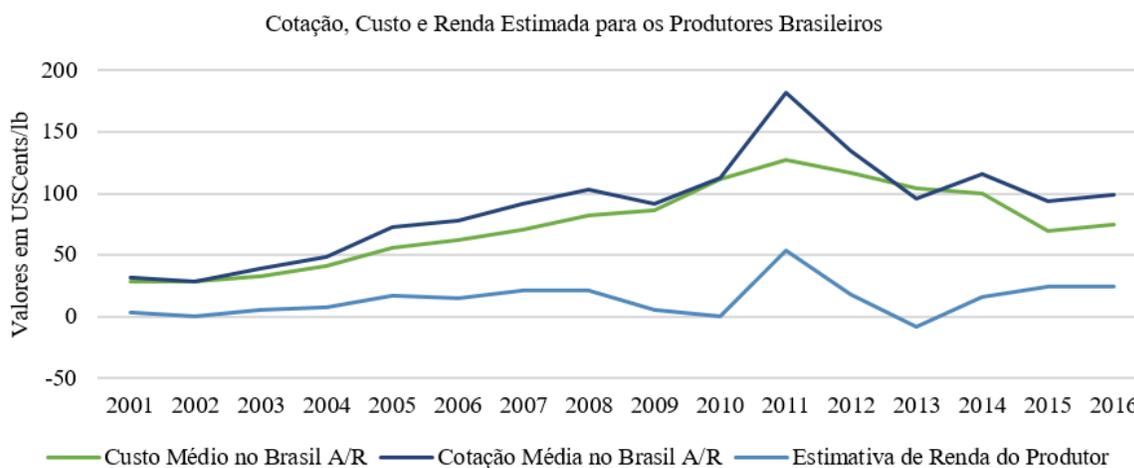


Figura 2.7 – Cotação, custo e renda estimada do café Arábico e Robusto (A/R) para o Brasil. Fonte: Conab [13].

Nota: - A renda estimada é calculada como a cotação média no Brasil menos os custos médios anuais em várias regiões produtoras. Os custos médios anuais calculados pela Conab englobam vários custos fixos e variáveis diferentes, tais como fertilizantes, mão-de-obra, equipamentos, depreciações, terras, etc. Foi considerado o valor médio da taxa de câmbio no período. Os custos em outros países produtores seguem o mesmo cenário de aumento conforme dados do ICO [23].

2.3.1 Beneficiamento de café, preços e custos de produção

Os processos de beneficiamento de café são formados pela colheita e pela pós-colheita, que são caracterizados pelo tratamento do café cereja, sendo realizado a derriça,

secagem (ao sol e/ou mecânica) e a retiradas das cascas até o ensacamento, onde são geradas unidades de 60 kg de café verde. A colheita processa toda a capacidade de produção das lavouras, pois, para os produtores, não existe interesse em deixar café nas lavouras (a capacidade de utilização da capacidade de produção é de 100% [35]). Não sendo supostas perdas de produção, a produção final é igual a capacidade de produção das lavouras de cada ano. Neste trabalho, as possíveis perdas de produtos nos processos de colheita e beneficiamento não serão consideradas, apesar de existirem.

Como a capacidade de utilização é de 100% e havendo tantos fatores que alteram a produção, a taxa de produção de café é uma variável extremamente difícil de ser controlada num curto prazo. Para longos prazos, estratégias de controle de produção visando o controle dos suprimentos e dos preços poderiam ser propostas mediante correção da capacidade de produção (taxas de plantio e cuidados). Entretanto, tais estratégias devem ser de difícil aplicação dadas tantas complicações de gestão das lavouras por muitos anos.

Os processos de colheita e pós-colheita não são função dos preços praticados de modo geral. As colheitas são feitas mesmo com preços baixos, mesmo que seja para cobrir possíveis prejuízos. Os processos de beneficiamento são função dos custos de produção, que são em maior porção fixos como a mão-de-obra, os equipamentos, os transportes e a depreciação das lavouras entre outros.

Segundo dados do primeiro levantamento da safra brasileira de café de 2016, as estimativas das taxas mensais de colheita do café seguem o mesmo padrão desde 2008 [12]. A Figura 2.8 descreve as estimativas de taxas mensais de colheita de café para a safra 2016.

A colheita de café segue um calendário bem definido que, geralmente, se inicia no mês de março e termina em outubro, fato que ocorreu nas últimas 8 safras de 2008 a 2015. A concentração da colheita ocorre, geralmente, entre maio e agosto, onde cerca de 90% do café é colhido [11]. Nesta fase, outono e inverno no Brasil, os cafés não podem ter muito contato com umidade para não perderem qualidade. Apesar do documento da Conab abordar que tal padrão ocorre desde 2008, possuímos indícios da cadeia de produção e da história da cafeicultura de que este padrão é constante.

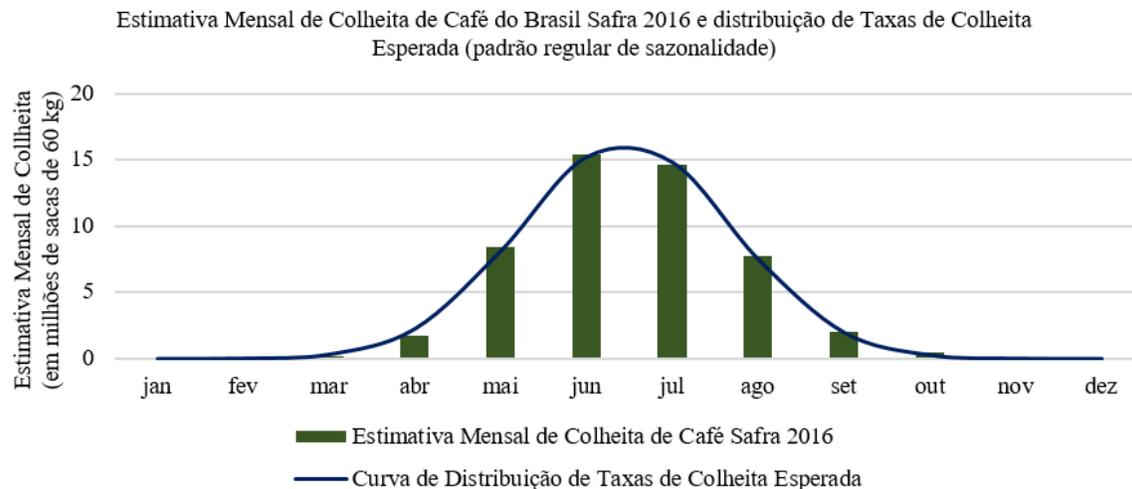


Figura 2.8 - Estimativa mensal de colheita de café do Brasil para a safra 2016 e curva de distribuição de taxas de colheita esperada. Fonte: Conab (adaptado) [13].

Se analisarmos os dados do levantamento da Conab, identificamos que no Brasil existem diversas regiões produtoras de café e que possuem diferentes taxas de colheita ao longo do ano safra [11]. Mas, pelas estimativas de colheita, observamos que existe uma série temporal de dados que capta um padrão regular, uma sazonalidade [34].

O que se observa é a influência das estimativas de produção, durante o processo de produção, nos preços. Quanto mais (ou menos) se estimar produzir e se efetivamente (ou não efetivamente) produzir, mais (ou menos) expectativa de aumento de estoques ou ofertas de cafés e mais (ou menos) os preços futuros negociados nas bolsas caem (ou sobem), espelhando este cenário nos preços. Outra ideia que reforça este cenário é o desejo de se desfazer dos estoques velhos de café quando novas sacas vão chegar nos armazéns, fato que, somado a média de preços caindo no primeiro semestre do ano (geralmente), pode explicar a média de exportações mais alta no segundo semestre de cada ano. Mais detalhes poderão ser vistos mais à frente na seção 2.5.

Esta realidade pode ser observada também na Figura 2.9, que descreve as estatísticas mensais das cotações dos contratos do café arábico com vencimento em setembro de 2015 (CFEU15), indo de novembro/14 a setembro/15 (período que representa um ciclo do processo de germinação, beneficiamento e produção). Esta época foi propícia para os produtores realizarem *hedge* de venda na BM&FBovespa, pois, de novembro/14 a julho/15, o café arábico, em média, teve margem líquida (ML)¹⁵ de 106 reais por saca, alta de 17,49 % em

¹⁵ Margem Líquida é obtida pela diferença entre o preço médio de venda e o Custo Operacional Total (COT).

novembro comparado com julho ([8] e [6]). Historicamente, as cotações do café apresentam este comportamento, ideia reforçada pelo gráfico das médias dos preços corrigidos pela inflação entre 2000 e 2015, conforme Figura 2.10, e pelas correlações estatísticas da Tabela B.4. O melhor período para *hedges* deste tipo é de dezembro a março de cada ano. A princípio, o atraso de tempo entre as cotações de contratos na bolsa e os preços varia de 1 a 3 meses, visto que os contratos são definidos para vencer em março, junho, setembro e dezembro.

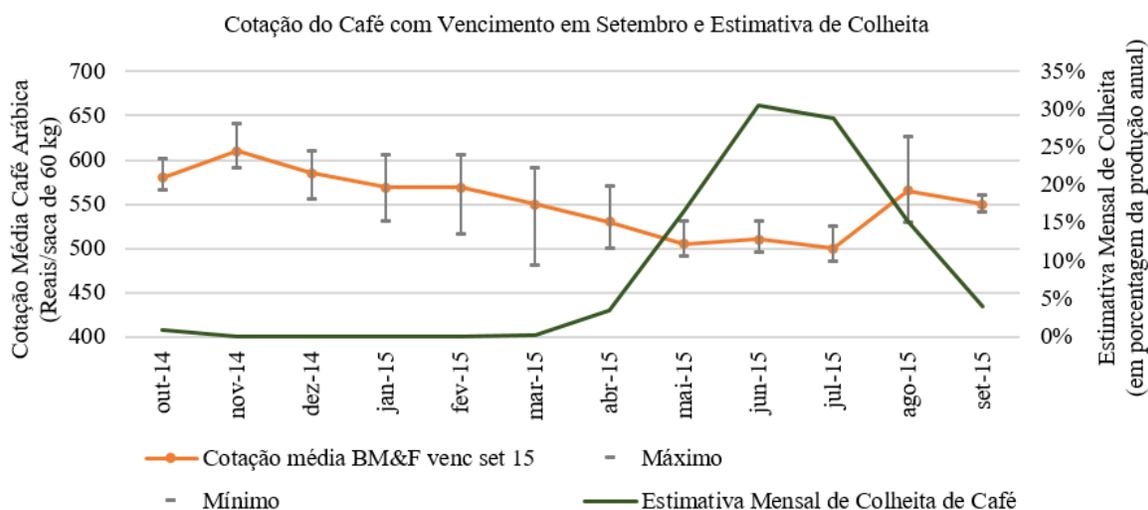


Figura 2.9 – Cotação média do Café Arábica na BM&FBovespa – Contrato com Vencimento Setembro/15 (CFEU15). Fonte: CNA [8] e Bovespa [6].

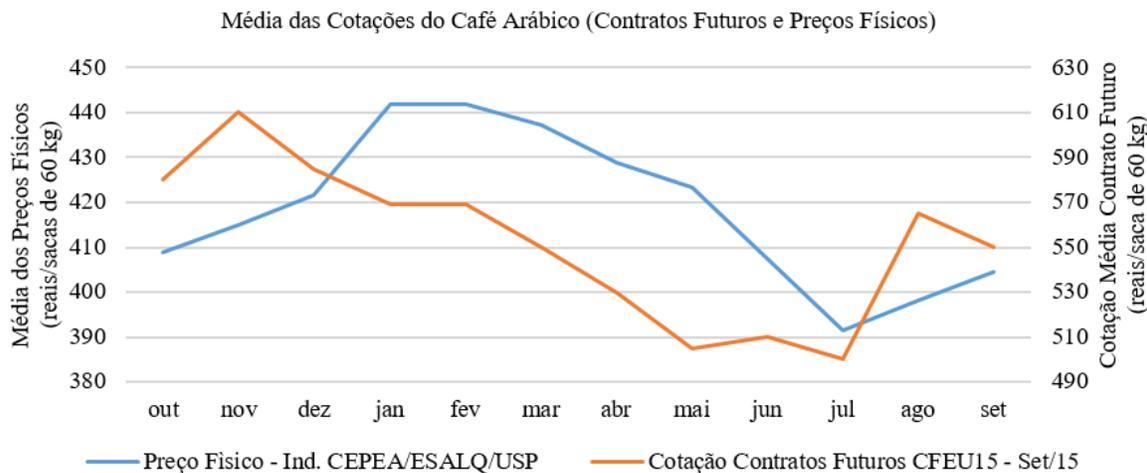


Figura 2.10 – Média das cotações mensais dos preços do café arábico – indicador CEPEA/ESALQ/USP, considerando a inflação entre o período de 2000 a 2015, e média das cotações dos contratos futuros (CFEU15) ([6] e [7]).

O gráfico da Figura 2.9 compara as cotações com as estimativas de colheita, que apresentam uma correlação de -0,78. Se considerarmos um efeito não-causal, onde os preços

futuros reagem antecipadamente em um mês em relação as estimativas de colheita, a correlação passa a -0,87. A princípio, tomando as médias dos preços cotados, existe uma correlação estatística negativa entre os dados relatados, apontado uma possível relação entre as estimativas ou expectativas de produção e os preços futuros cotados no presente e os preços cotados. Apesar de se tratar do café arábico, este comportamento pode ser expressado para todos os cafés.

A reação dos preços às taxas de colheitas por safra é documentada por outros autores como Deaton e Laroque [16] e eles expressaram esta relação como observado na Figura 2.11. O gráfico mostra várias curvas de preços $P(x)$ em função das taxas de colheitas (“availability, x ”). É identificada a influência das capacidades de produção por safra, onde a safra de baixa produção (curva “*minimum harvest*”) descreve uma curva de preços que tendem a decair menos com o aumento da taxa de colheita. Os preços tendem a decair mais para as mesmas taxas de colheita quando é espetada uma safra alta (curva “*maximum harvest*”). A variável x , taxa de colheita ou disponibilidade de grãos, foi idealizada para apresentar valores negativos para ser suposto os períodos de entressafra. Na entressafra os mercados contam somente com os estoques de café colhidos e os preços tendem a permanecer altos.

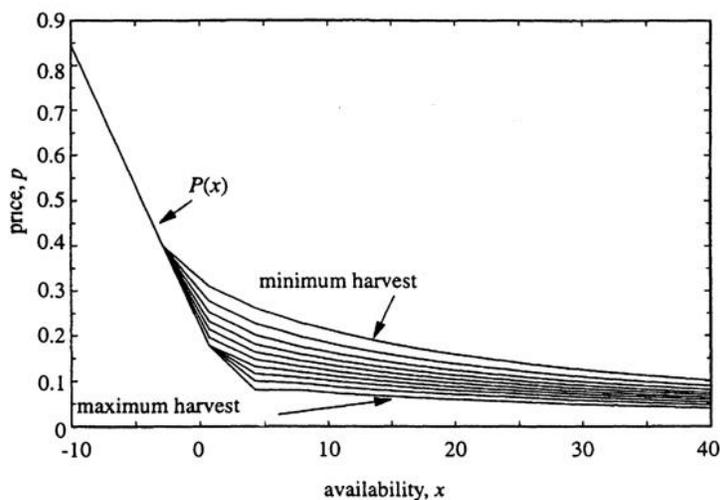


Figura 2.11 – Variação dos Preços do café em função da disponibilidade traçada pela colheita. Fonte: Deaton e Laroque [16].

2.4 Estoques de café verde

Um dos principais fatores determinantes dos preços, como visto, são os movimentos dos estoques mundiais, principalmente no longo prazo, como exibido nas Figura 1.1 e Figura

2.4, e que teriam se intensificado com a liberação de mercado após 1990. As correlações estatísticas entre os estoques dos países produtores e os preços apresentam maior significância, sendo apontado ser de -0.76 entre 1965 e 1989 e de -0.71 após 1990 pelo ICO ([23] e [22]). Entre os estoques mundiais e os preços, as correlações foram calculadas ser de -0.77 entre 1965 e 1989 e de -0.81 após 1990 [23]. Proporcionalmente, os estoques dos países produtores apresentam maior influência nos preços do que os estoques nos países importadores. A influência dos estoques brasileiros na formação de preços pode ser observada nas correlações estatísticas da Tabela B.3, que possuem tendência a -1. Os estoques dos países produtores são função da produção, consumo doméstico e das exportações [23].

Aliás, os estoques dos países importadores tendem a serem constantes, ou bem-comportados, pelo controle das importações e reexportações e manutenção dos consumos. No entanto, são observadas possíveis implicações dos movimentos dos preços nos estoques dos países importadores, sobretudo nos picos de preços. Isto porque os importadores tendem a importar menos para preços altos e mais para preços baixos, permitindo, assim, que seus estoques sejam consumidos quando necessário. Entretanto, este mesmo comportamento também pode ser ligado aos excedentes de café (baixos e altos) de algumas origens. Por exemplo, devido às alterações climáticas, percebe-se as influências das baixas de estoques entre 1994 e 1999 descrito na Figura 2.4 e abordado pelo ICO [23]. A correlação estatística dos estoques dos importadores com os preços entre 1990 e 2013 é de -0,45. Os inventários dos países importadores são função da importação, consumo e reexportação.

Representado um extremo de mercado, para altíssimos preços seguidos de muitos investimentos, com a baixa elasticidade da oferta em relação à demanda, a produção pode atingir cifras altas: superproduções. As superproduções que abastecem os estoques dos produtores implicam em muita oferta e, portanto, muita queda de preços em seguida, como em 2002. Os produtores tomam decisões antecipadas e adaptativas quanto aos investimentos nas lavouras motivados pelas correntes de preços e pelas expectativas de preços ([22], [23], [18] e [35]). Segundo Osorio [35], esta situação é agravada pelo fato das lavouras novas começarem a dar retorno entre 4 e 5 anos, quando não existem mecanismos eficientes de previsão de preços para este horizonte.

Como vimos, a produção é uma variável difícil de ser controlada, assim como a capacidade de produção. Uma estratégia de controle pelos estoques de café verde visando controle de suprimentos e preços aparenta ser mais plausível, mas, como sabemos, várias estratégias relacionadas a estoques falharam.

2.4.1 Estoques de café verde nas cooperativas

Conforme dados da Conab, que apontam as taxas de recebimento de sacas de café pelas cooperativas durante os anos de 2000 a 2003, é possível identificar um comportamento similar das colheitas nos recebimentos. Apenas pelo fato que o café verde, uma vez colhido, é beneficiado pelo agricultor antes de ser entregue à cooperativa ou a outro sistema de estocagem/comercialização disponível. Portanto, uma vez observado a correlação entre as taxas de colheita e recebimento de café, é identificado um atraso de 2 meses entre as duas taxas. Este período de 2 meses representa a fase de pós-colheita, sendo evidenciado que os recebimentos começam no mês de maio e terminam, a princípio, em dezembro.

A Figura 2.12 apresenta os dados de recebimento de sacas de café pelas cooperativas brasileiras nos anos de 2000 a 2003. A Figura 2.12 mostra também a evolução dos estoques de café nas cooperativas brasileiras. Pelo gráfico, fica evidente a integração das taxas de recebimento nos armazéns, apesar de não serem conhecidas as taxas de saída de café dos armazéns.

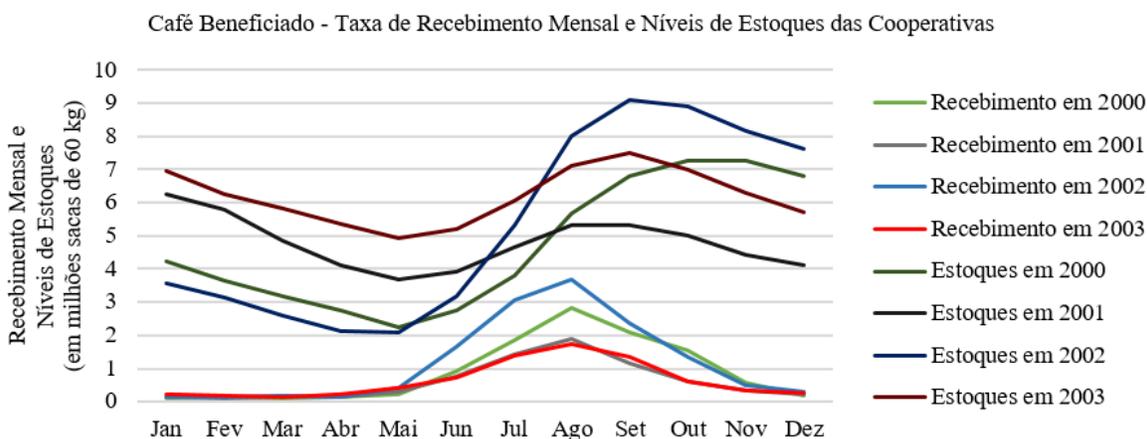


Figura 2.12 – Taxa de recebimento mensal e níveis de estoques de sacas de café nas cooperativas brasileiras. Fonte: DECAF [17].

2.5 Exportações, importações e reexportações

As exportações dos países produtores estiveram em ascensão nos últimos 50 anos, embora tenha tido algumas pequenas interrupções e as políticas de quotas. As interrupções coincidem com os períodos de impactos climáticos, pois é quando os excedentes baixam nos países produtores. Em termos de ganhos em dólares, a sequência de maiores exportadores é: Brasil, Colômbia e Vietnã [23]. No contexto geral, é observado o fluxo de cafés dos países exportadores para os países importadores através das taxas de exportação e importação publicadas, que são bem próximas como mostra a Figura 2.13.

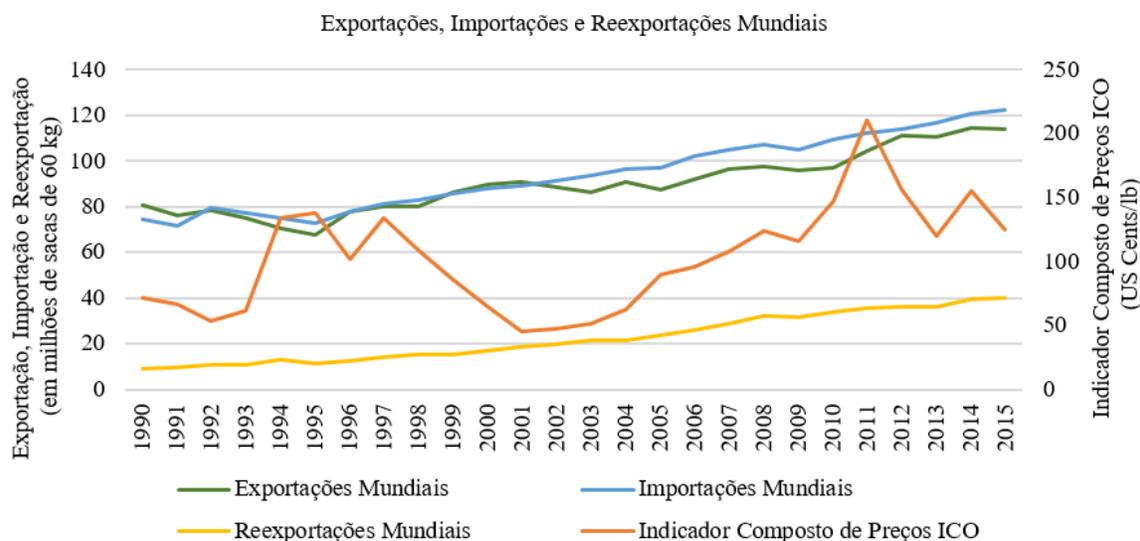


Figura 2.13 – Exportações, importações e reexportações de café comparado com o indicador ICO desde 1990. Fonte: ICO ([22] e [23]).

As reexportações dos países importadores tiveram crescimento constante nos últimos anos conforme Figura 2.13. Os produtos de reexportação são variados sendo encontrados o café verde, o torrado e o solúvel. Neste trabalho, não foram analisadas as causas do crescimento das reexportações, nem as características em torno das importações e dos controles dos países importadores.

O principal foco será nas taxas de exportação do Brasil. A Figura 2.14 mostra as exportações brasileiras que possuem forte correlação com as taxas mundiais. A produção exportável, que é definida como a produção anual descontado o consumo doméstico anual, também pode ser observada e apresenta forte correlação com a produção, supondo que o consumo doméstico possui crescimento exponencial.

A taxa de café exportado pelos países produtores depende de três fatores basicamente: demanda de mercado, preço à vista e o total de café ofertado ao mercado externo (excedentes). Entretanto, a taxa pode depender também das expectativas de mudanças de produção, do financiamento de custos de colheita e armazenagem pelo governo, da venda de opções vendidas para os produtores pelo governo e das variações de taxas cambiais e de outros commodities como o petróleo ([24] e [28]). O total de café ofertado é função da produção exportável, além dos excessos nos níveis dos estoques. A produção exportável é disponibilizada para as exportações no ano seguinte ao ano safra (mais fortemente). Há exceção quando existe algum tipo de mecanismo regulatório como as quotas de exportação aplicadas nas décadas de 70 e 80 [27].

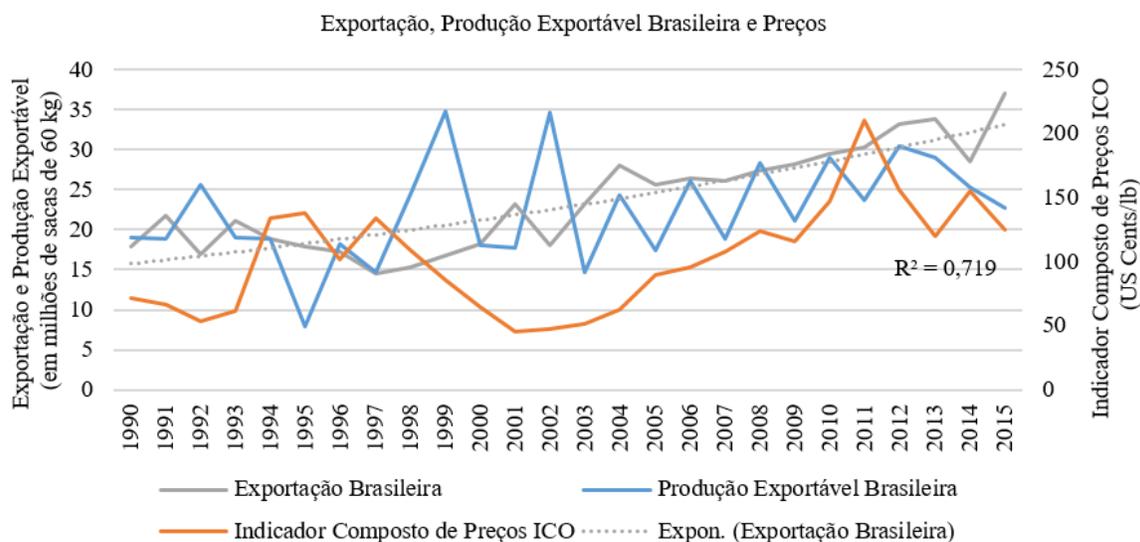


Figura 2.14 – Exportação e produção exportável brasileira comparada com o indicador ICO desde 1990. Fonte: ICO ([22] e [23]).

A tendência exponencial de exportação é explicada pelas taxas de consumo crescentes dos países importadores e consumidores, que puxam a exportação brasileira. A taxa de exportação descontada a tendência mostra a implicação dos preços altos e baixos dos *commodities* e os efeitos dos excedentes de produção. Esta relação causal pode ser identificada na Figura 2.15 que mostra os volumes médios exportados mensalmente. Embora, para a escala em meses, justamente à época de preços mais baixos (colheita) seja coincidente com volumes exportados mais baixos.

O gráfico da Figura 2.16 identifica a diferença entre a taxa de exportação de café e a tendência exponencial traçada na Figura 2.14 (decomposição de modos de referência [37]).

Os resultados dos estudos de correlação estatística não são muitos expressivos, mas a correlação entre os preços e a variação das exportações foi de -0,65 com um atraso de um ano com relação aos preços.

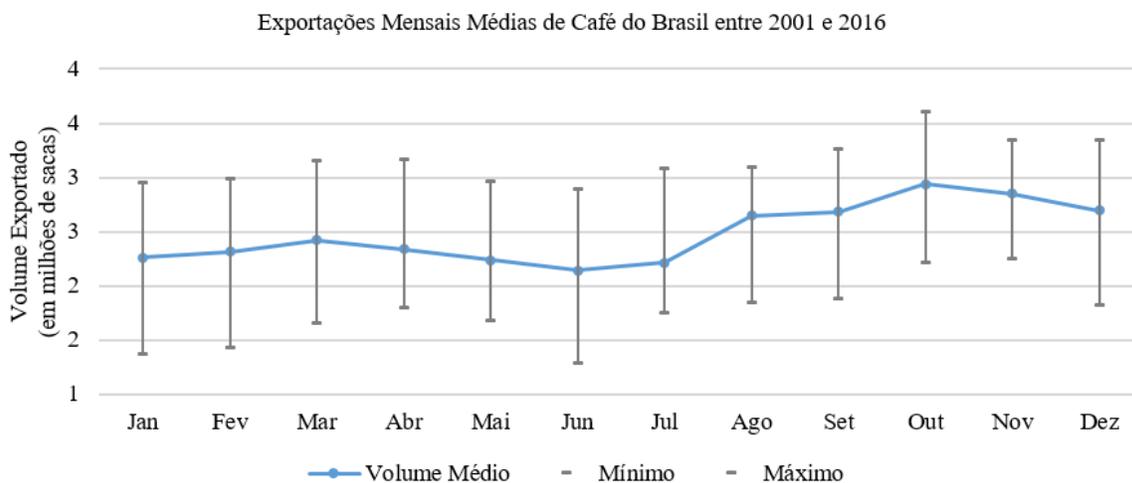


Figura 2.15 – Volume médio mensal exportado pelo Brasil entre 2001 e 2016. Fonte: Conab [13].

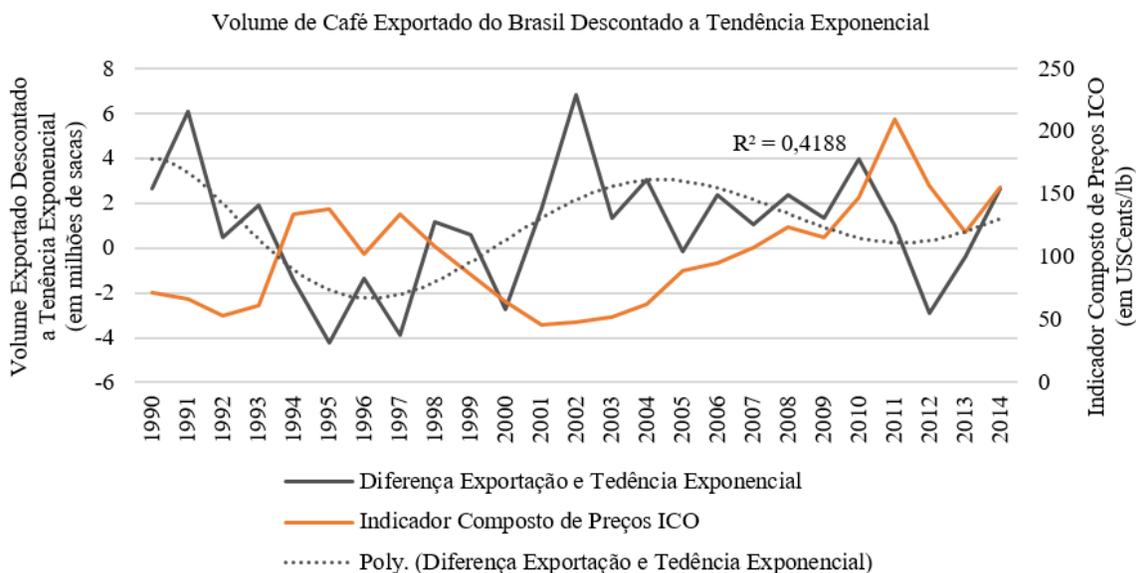


Figura 2.16 – Volume de café exportado pelo Brasil descontado a tendência exponencial entre 1990 e 2014. Fonte: Autor (2016) e Conab [13].

2.6 Consumos de café

O consumo mundial de café sobe exponencialmente como visto, mas não nos mercados tradicionais. São três os mercados de consumo: Consumo doméstico dos países produtores, consumo dos países importadores tradicionais, que estão estáveis em um dado patamar, e

consumo dos países emergentes, que também cresce exponencialmente [23]. Apesar dos mercados consumidores tradicionais estarem estagnados, eles continuam como o principal mercado consumidor, sendo representado pelos Estados Unidos, Alemanha, França, Itália e Japão.

Não foi encontrado uma explicação exata do porquê destes comportamentos nos consumos. Alguns autores apontam o aumento da população como principal causa, mas não foram encontrados indícios exatos desta hipótese ([46] e [27]). Embora nos países produtores e emergentes, como o Brasil, nos últimos 50 anos, ocorreu um crescimento populacional e uma remodelagem demográfica. A população brasileira cresceu cerca de 185 % desde 1960. Este aumento de população pode indicar o aumento de consumo ocorrido, mas não garante que haverá mais crescimento no futuro. Nos países consumidores tradicionais como os Estados Unidos, o consumo se mantém praticamente estável mesmo com aumento da população, que foi de cerca de 78% desde 1960.

Os preços e os consumos parecem não possuírem relação dinâmica pelos dados e informações disponíveis, como visto na Figura 1.1 e Figura 2.3. No entanto, o consumo é um fator gerador de preços. É esperado que mais consumo eleve mais os preços, apesar da falta de correlação entre as variáveis. Cabe ressaltar que os mercados consumidores tradicionais e não-tradicionais podem aumentar sua participação de consumo, mediante mais incentivos em várias frentes, reduzindo os espaços de suprimento e demanda. Entretanto, os fatores de desequilíbrio de mercado devem persistir devido à dinâmica do café e as consequências do aumento dos consumos devem ser analisadas.

2.7 Alterações climáticas e volatilidade de preços

Os impactos climáticos (geadas e secas) na produção de café são observados, pelo menos, desde 1882 ([28] e [27]). Estudos recentes sobre impacto do clima nas lavouras no mundo apontam um cenário sombrio, onde são previstos o fim da cultura em alguns lugares como no país origem do produto, a Etiópia, por volta de 2080 [23].

A volatilidade dos preços é a principal preocupação para os investidores como ocorre em toda *commodity*. Nos países produtores, a volatilidade é fonte de incertezas nos ganhos e receitas, assim como representa instabilidade nos lucros dos produtores e traz implicações para a decisão de investir em novas lavouras [32]. Nos países consumidores, a volatilidade

traz dificuldades ao planejamento e controle de custos das torrefadores, além de afetar a margem de ganhos dos investidores, o que torna a atividade menos atrativa ([23] e [45]).

Os períodos de maior volatilidade são registrados na época de mercado livre e nas épocas de grandes impactos climáticos, sobretudo no Brasil em 1975, 1985 e 1994, quando são registradas geadas e/ou secas e em 1999, 2014, 2015 e 2016 quando foram registradas secas ([11] e [28]). Em 2013, também foi registrado seca no Vietnã (segundo maior produtor mundial) [23] e, em 2010, chuvas fortes na Colômbia [7]. Apesar das constantes alterações climáticas afetarem o café, a indústria e os produtores têm se transformado de modo significativo e as respostas dos preços a impactos exógenos têm mostrado um menor atraso, permitindo uma correção mais rápida [23].

A falta de elasticidade do suprimento e demanda com relação aos preços dificulta a correção dos produtores para não gerarem excedentes e escassez, causando também volatilidade de preços ([23] e [32]). Porção da volatilidade está relacionada à especulação de preços e à aversão ao desabastecimento, uma vez que diminui a capacidade de suprimento quando ocorre algo como uma alteração climática. Este cenário leva a investimentos que culminam em superprodução de café nos anos seguintes e tornam a dinâmica dos preços mais complexa ainda.

São três situações de alterações climáticas mais representativas: no inverno, podem ocorrer geadas; na primavera, podem ter secas/tempestades (falta ou excesso de chuvas e com granizo, má distribuição de chuvas e altas temperaturas); no verão, podem ocorrer secas/tempestades. As geadas de inverno e chuvas fortes de verão (com granizo) podem destruir árvores de café. As secas de primavera e de verão podem influenciar nas floradas/maturação e diminuir a produtividade. As baixas no estoque de árvores levam a baixas de capacidade de produção mais severas. As baixas de produtividade por falta ou excesso de chuva podem ser recuperadas no curto prazo, geralmente. As árvores destruídas podem ser podadas e replantadas integrando os estoques em formação, que podem voltar a fase produtiva entre 1 e 4 anos ([9], [11] e [28]).

2.8 Políticas e estratégias do mercado

As cotas de exportações, embora não tenham sido contínuas durante o período entre 1965 e 1989, podem ter prejudicado os ganhos dos produtores, visto que os preços do varejo,

atacado e do *commodity* se mantiveram distantes dos preços pagos aos produtores. Os países importadores conluiaram para impor as quotas, que foram ajustadas de acordo com os preços internacionais e os países produtores ofereceram alguma resistência até sucumbir pela pressão dos altos estoques. Esses acordos colapsaram, não evitando as oscilações e, quando em vigor, desestimularam os produtores a investir. Houve um isolamento de parte dos produtores, pois os preços e as taxações domésticos foram projetados para as produções locais [32]. A indústria de torrefação tem mostrado muita força na consolidação dos preços, principalmente nas discrepâncias entre o varejo e o atacado [32].

Quanto aos preços do *commodity*, desde 1990, as forças de mercado estão livres para determinar o caminho da cafeicultura [23]. Os preços pagos aos produtores apresentam maior correlação com os preços comercializados nas bolsas [32]. Mesmo com mercados livres, os ciclos nos preços continuam presentes, como já exposto na seção 2.1.

Para Laignelet [27], o fracasso da política de estabilização por quotas era bem previsível, pois estoques de café internacionais devem causar efeitos contrários, piorando o cenário dos preços. Os suprimentos não deveriam ser função dos excedentes e os tempos de ajuste de estoques precisam ser maiores. A estratégia mundial recomendada por Laignelet em 1976 é apresentada na equação (2.1).

$$\text{Suprimento} = \text{consumo médio} + \frac{\text{Estoques dos produtores} - \text{Estoques desejados}}{\text{tempo de correção dos estoques dos produtores}} \quad (2.1)$$

A política de preços mínimos é uma garantia dada pelo governo aos produtores caso os preços caiam muito. Este recurso é limitado às épocas de preços muito baixos e carecem de ações políticas, inclusive para definição dos valores de preços mínimos. Sua aplicação, apesar de importante, é bastante limitada. Atualmente, os valores propostos tecnicamente não cobrem nem os custos dos produtores.

As estratégias indicadas atualmente para proteção contra os riscos do mercado são os contratos a termo; os contratos futuros e os contratos de opção [33]. O uso dessas ferramentas de risco pode ajudar aos compradores e exportadores a proteger suas margens de ganho e repassar maiores preços aos produtores. Sem esses recursos, a maior porção dos prejuízos fica com os produtores, pois os outros agentes tomam margens mais altas contra oscilações dos preços internacionais. Mais ainda, estas ferramentas permitem aos exportadores adotarem estratégias flexíveis de suprimento do mercado, protegendo o valor dos seus

estoques ([22] e [23]). Entretanto, estas estratégias protegem mais eficientemente contra as volatilidades do café no curto prazo.

Todos estes recursos descritos acima são mais empregados para os produtores, empresas e profissionais que trabalham diretamente no setor econômico. Os pequenos produtores e, talvez, suas cooperativas ficam mais desprotegidos. Um recurso de proteção de riscos aplicado recentemente para estes atores é a certificação de produto, que incorpora aspectos de sustentabilidade, que pode tratar de cuidados com ecossistemas, erosão de solos, desertificação, desmatamentos e poluição dos solos e águas¹⁶. Contudo, esta solução também é restrita sob vários aspectos ([22] e [23]).

Todos os recursos descritos não tratam das principais fontes de oscilações. Um modelo da dinâmica do sistema da cadeia de suprimento e do mercado do café pode garantir e reforçar os mesmos recursos de proteção diretamente aos produtores.

2.9 Alterações estruturais observadas

Algumas alterações estruturais importantes são observadas nestes últimos 50 anos de cafeicultura, em especial no Brasil, sendo as principais: a maior capacidade de irrigação; o aumento das densidades de árvores plantadas, a semi-mecanização e mecanização dos processos e o êxodo de mão-de-obra jovem no campo, impulsionado principalmente nas épocas de baixos preços e pela procura de qualidade de vida ([22] e [23]).

Desde 2004, o fator de bianualidade da produção brasileira vem caindo, mostrando uma tendência de equalização de produção. Este fato tem sido ligado a indicação de uma saturação da capacidade de produção das lavouras e devido principalmente à mais irrigação ([22] e [23]).

Existem outros indícios que reforçam a ideia de saturação da capacidade, tais como: a área plantada total e os estoques de árvores produtivas estabilizaram, mas as densidades de árvores plantadas aumentaram e a formação cresceu, indicando que lavouras antigas estão sendo substituídas por lavouras mais densas ([28] e [23]). Em 1960, havia cerca de 900 árvores produtivas por hectare e, em 2013, foram registradas 2800 árvores produtivas por

¹⁶ Vários estudos mostram que as práticas agrícolas mal aplicadas, inclusive na cultura do café, levam a degradação do meio ambiente [23].

hectare. O cenário de 2003 a 2013 pode ser observado na Figura 2.17. O aumento das áreas plantadas e das densidades de árvores ocorreu em áreas menos suscetíveis às geadas, mas que requerem mais irrigação para combater as secas. Entretanto, as secas podem atingir o ponto de prejudicar tanto quanto as geadas e destruir lavouras [28].

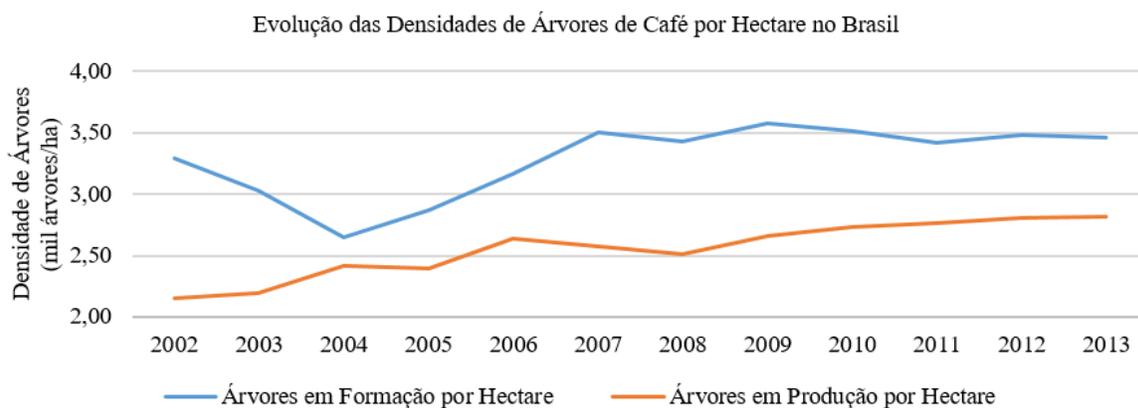


Figura 2.17 – Evolução das densidades de árvores em formação e produtivas por hectare no Brasil entre 2002 e 2013. Fonte: Conab *et al.* [11] e USDA [44].

Outro fenômeno estrutural importante recente é a semi-mecanização e mecanização das lavouras, que diminuem os custos de produção, aumentam as taxas de colheita, eliminam empregos, mas geram empregos qualificados [23]. A mecanização soluciona outra questão importante que é a falta de mão-de-obra jovem no campo para a derriça.

O uso de outras tecnologias, tais como o emprego de sementes selecionadas e mais resistentes, tem diminuído o tempo de maturação das plantas, tem aumentando a produtividade por planta, apesar do gráfico da Figura 2.5 não enfatizar isso, e tem garantido mais qualidade dos cafés. Laignelet [27] modelou um fator para tratar dos avanços tecnológicos, mas neste trabalho não foram propostos parâmetros para avaliar esta peculiaridade.

No Brasil existem 20 regiões produtoras de café segunda a Conab e a Embrapa Café espalhadas em 7 estados. Os estados do nordeste e do sudeste sofrem mais com as secas e os estados do sul com as geadas. Todas as regiões possuem tecnologias mecanizadas e semi-mecanizadas e mesmo em regiões montanhosas existem alguns recursos sendo aplicados e desenvolvidos, apesar de ainda ter algumas regiões com produção manual. Apesar do fato destas regiões apresentarem algumas características peculiares como diferentes produtividades e qualidades, todas elas apresentam as principais alterações estruturais

observadas nesta seção. No contexto geral, neste trabalho, foi suposto um modelo dinâmico para todo o Brasil, sem individualizar as características peculiares de cada região.

2.10 Relação suprimento e demanda e os preços

Para melhor entender a dinâmica de mercado, vamos observar os pontos descritos até aqui e os gráficos das Figura 2.18 e Figura 2.19. Se a razão produção/consumo for maior que 1, então temos excesso de produção, caso contrário, teremos escassez. As quedas e altas de preços dependerá dos níveis de estoques, da produção, e de adversidades (alterações climáticas como em 1994) que ameacem as disponibilidades de suprimento (estoques totais mais produção anual). Neste caso, quando a relação estoques/demanda fica abaixo de 0,5 (suficiente para 6 meses de demandas), os preços tendem a subir. Os estoques dos países importadores parecem ser controlados para atender até 2 meses de demandas segundo dados do ICO ([22] e [23]).

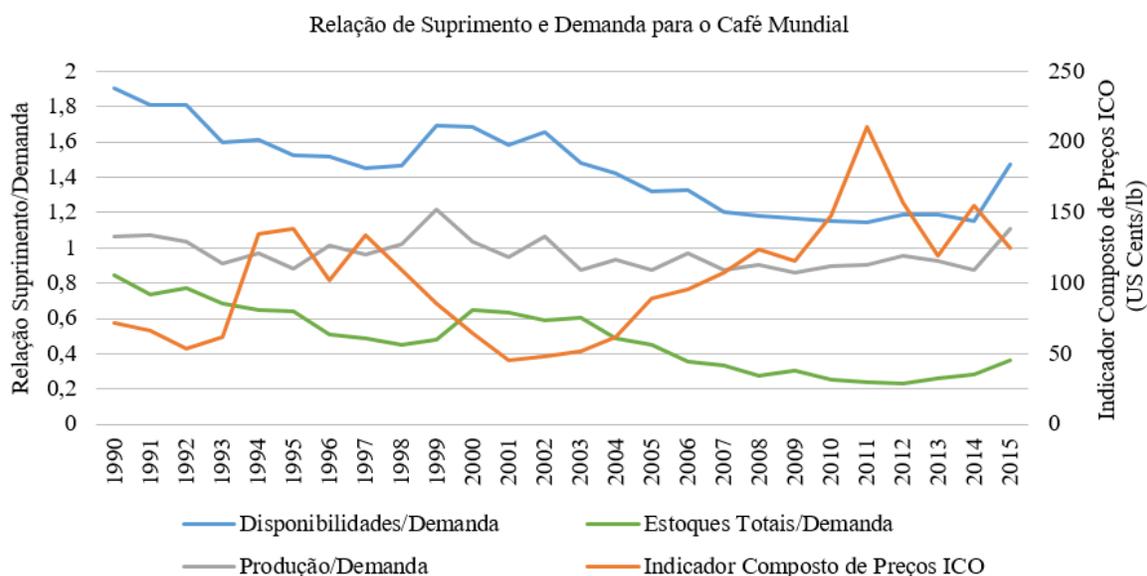


Figura 2.18 – Relação de suprimento e demanda para o mercado mundial de café ([22] e [23]).

- Nota:
- Disponibilidade = Estoques Totais + Produção Anual;
 - Estoques Totais = Estoques Países Produtores + Estoques Países Importadores;
 - Demanda = Consumo Doméstico + Consumo Países Importadores + Reexportações;

Entre 1965 e 1990, a razão entre a disponibilidade mundial de café e o consumo mundial foi de 1,81, segundo o ICO [22]. Ou seja, a disponibilidade podia suprir a demanda por quase 2 anos. Já a razão estoques e demanda mundial era de 0,80 e a razão produção e demanda mundial era de 1,02. Ou seja, 80% do consumo estava assegurado pelos estoques.

Entretanto, como vimos, a produção tem influência limitada nos preços quando comparada com os estoques, sendo mais representativa no tempo de colheita, puxando os preços para baixo num curto prazo [23].

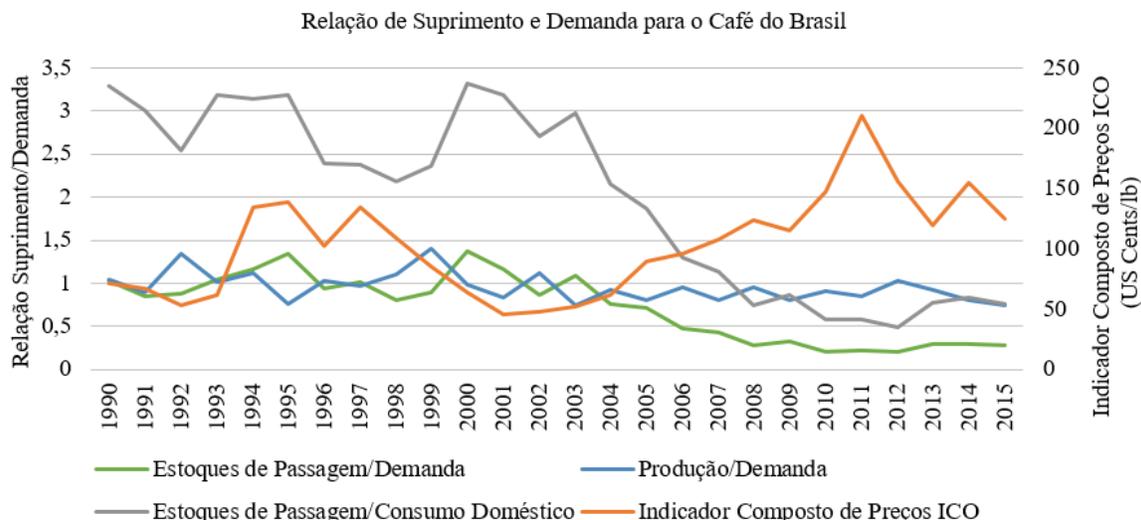


Figura 2.19 – Relação de suprimento e demanda (Exportação + Consumo Doméstico) para o mercado do café brasileiro ([22] e [23]).

Para alguns autores, o cenário de crescimento do consumo pode ajudar a manter um estreito equilíbrio entre o suprimento e a demanda. Principalmente, considerando a possível saturação da capacidade de produção e a busca por soluções sustentáveis de crescimento de produção (Isto significa maior tempo de ajuste de suprimentos como apontado por Laignelet [27]). Entretanto, este possível equilíbrio de mercado entre preços e quantidades é frágil demais devido à falta de elasticidade dos suprimentos e demandas. Quando os desequilíbrios se acentuam, todo o mercado reage com muitos atrasos. Neste sentido, as políticas de preços mínimos, implementadas por alguns governos, parecem soluções viáveis para socorrer os produtores em épocas de preços baixos com a intenção de cobrir, no mínimo, os custos de produção.

A estimação dos estoques de passagem é uma tarefa bastante complexa, porque não existem dados e informações suficientes sobre este conceito de estoque. Mesmo os organismos nacionais, que possuem amparo governamental para tratar desses dados, aparentam não conseguir estimar com precisão estes estoques. Nos relatórios da Conab são descritas as quantidades de órgãos, cooperativas, armazéns, empresas e indústrias que fornecem dados, mas sempre há instituições que não fornecem informações.

Uma das queixas dos organismos internacionais é a falta de transparência das informações ou previsões imprecisas, principalmente dos níveis de estoques nos países produtores. Isto prejudica outras previsões e gera mais volatilidades e especulações de mercado. Esta dificuldade em calcular, estimar e definir o comportamento dos estoques já foi alvo de muitos estudos e discussões e apresenta muitas controvérsias como aponta Mehta e Chavas *et al.* [32] e Daviron e Ponte [15].

Em suma, atualmente, as torrefadoras veem trabalhando fortemente nos últimos anos para gerar *blends*¹⁷ de café de qualidade para atender seus consumidores. Neste sentido, as torrefadoras ficam mais livres para adquirir *commodities* de diferentes origens. Com isso, os autores têm defendido que as torrefadoras estão empregando o sistema de gerência de estoques *Supplier-Managed Inventory* (SMI) [15]. Na prática, se terceiriza os custos de estocagem, se diminui os estoques de cobertura, além de deixar o fardo de gerência de estoques com outras indústrias [15].

A Figura 2.20 mostra os estoques de passagem publicados comparados com os estoques estimados para o Brasil, que são baseados no cálculo do balanço entre as produções e as demandas anuais (consumo doméstico mais exportações).

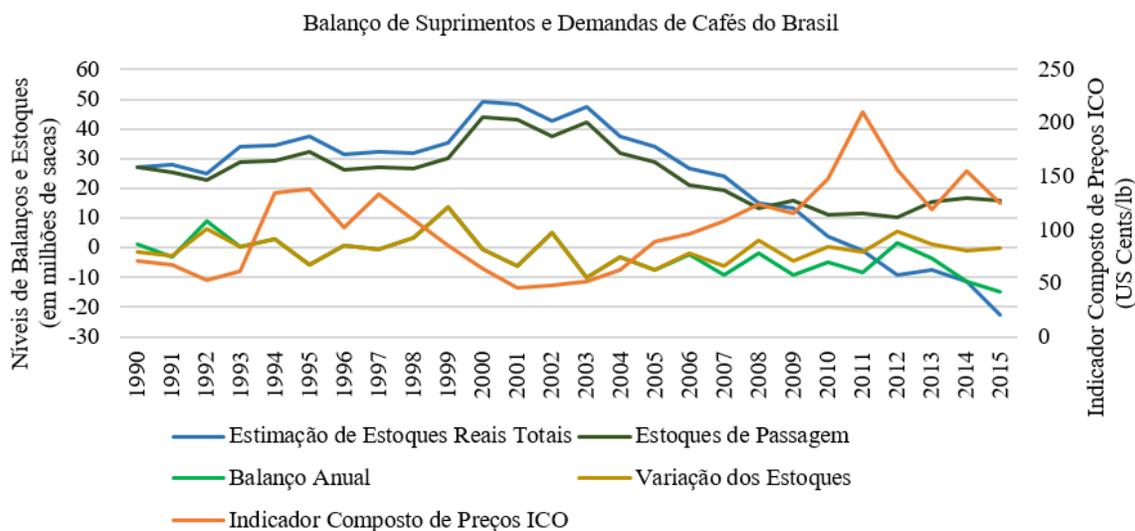


Figura 2.20 – Balanço anual do suprimento e das demandas de café do Brasil

Na Figura 2.20 podemos observar que as variações temporais dos estoques e os balanços se distanciam em alguns pontos das séries. A estimação, considerando o estoque

¹⁷ Misturas de diferentes origens e tipos de cafés para gerar novos produtos com qualidade e aceitação dos consumidores.

inicial publicado em 1990 de 26 milhões de sacas, chega a ser negativa em aproximadamente 23 milhões de sacas em 2015. O balanço total no período de 1990 a 2015 chega a ser deficitário em aproximadamente 64 milhões de sacas. No entanto, são publicados estoques de passagem de quase 16 milhões de sacas em 2015 e 2016.

Este capítulo é dedicado a descrever as principais características do mercado de café no Brasil e no mundo, que são a formação de lavouras, os processos de colheita e beneficiamento de grãos, a formação de estoques de café verde, as demandas pelo consumo doméstico e pelas exportações, a composição dos preços e custos e as características da comercialização. Vimos ainda o comportamento do mercado do café ao longo dos últimos 50 anos, onde é sugerido que a produção mundial reage subindo (caindo) à elevação (queda) de preços internacionais e, conseqüentemente, locais com algum atraso, que os preços reagem subindo (caindo) à queda (elevação) dos estoques mundiais, e que os consumos são inertes ao mercado. Os consumos sugerem crescer exponencialmente devido ao aumento populacional. As superproduções podem elevar muito os níveis de estoques. Além disso, as perturbações causadas pelas alterações climáticas e suas conseqüências foram descritas e as principais alterações estruturais foram identificadas. Os cenários de mercado já vivenciados foram apresentados e as informações necessárias para o desenvolvimento das hipóteses dinâmicas de causa e efeito para o modelo dinâmico foram evidenciados. Os principais atores estudados nesta dissertação são os produtores e cooperativas, a indústria de exportação e a indústria de processamento (as torrefadoras).

Capítulo 3

Revisão de dinâmica de sistemas

Este capítulo descreve uma revisão sobre SD, apresentando os meios para conduzir o processo de modelagem, em particular, pelo chamado “método padrão”: uma metodologia para desenvolvimento de modelos dinâmicos, documentada pelo professor Jim Hines do MIT e lecionada por ele na disciplina “*System Dynamics II: Applications of System Dynamics*” [21], sendo baseada nos passos e observações dadas por Sterman [42]. Além disso, são descritas as principais ferramentas de modelagem como o diagrama de causa-efeito (onde são estabelecidas relações de causalidade, sugeridas por relações matemáticas, séries temporais, análises estatísticas, correlações e métodos de regressão) e o diagrama de estoque e fluxo (onde são definidas as equações diferenciais e suas características). Por último, são descritos os principais modos de comportamentos de SD e o modelo genérico para o mercado de *commodity* apresentado por Sterman [42].

3.1 Sistemas dinâmicos e processo de modelagem

SD propõem modelar os fatores que causam comportamentos característicos dos sistemas. Em seguida, a maneira com que o sistema reage às mudanças associadas a estes fatores é observada. Baseadas nestas reações e modelos, as mudanças nas regras de controle, políticas e estratégias são sugeridas. Desta forma, o principal propósito de SD é melhorar o entendimento dos sistemas e sugerir alterações nas regras de tomada de decisões para um melhor desempenho. A dinâmica de sistemas é usada para entender as políticas/estratégias de decisão e as reações dos sistemas (realimentações de balanço ou equilíbrio e de reforço) ([14] e [42]).

O “Método padrão” é uma sequência de atividades ou processos, que podem ser seguidos para elaborar um modelo ou projeto. Os passos sugeridos são: (i) Definição do problema (lista e tipos de variáveis, modos de referência, estados do problema, condições iniciais e limites); (ii) Observar políticas/estratégias empregadas; (iii) Traçar hipóteses

dinâmicas; (iv) Gerar primeiro modelo com as condições iniciais; (v) Analisar os resultados, realizar testes de comparação, calibração e sensibilidades; (vi) Alterar/incrementar o modelo; (vii) Reanalisar o modelo; (viii) Etc. Durante as análises, novas ideias emergem, cenários possíveis emergem e devem ser analisados [21].

As variáveis podem ser classificadas como de estado e auxiliares, além de poder ser determinado as mais relevantes ou dominantes. Os modos de referência são definidos mediante observação gráfica com especial preocupação na identificação de atrasos, horizontes de tempo e pontos importantes tais como máximos, mínimos e inflexões. Variáveis podem ser decompostas e estimadas, baseadas nas características já observadas dos sistemas, séries temporais históricas, métodos de regressão e nos gráficos. Estimções servem para prolongar ou complementar dados faltantes ou, ainda, para predizer efeitos que auxiliam a complementar o modelo dinâmico desenvolvido [37].

3.2 Diagramas de causa-efeito

De posse de todos os dados do sistema e com foco no problema a ser resolvido, as hipóteses dinâmicas podem ser descritas mediante ciclos de realimentação. Os diagramas de causa-efeito são um mapa do sistema para gerar os padrões identificados pelos modos de referência estabelecidos [21]. Com os diagramas de causa-efeito (CLD – *Causal Loop Diagram*), dá-se foco nas características endógenas do sistema e revela-se a estrutura do sistema sendo possível determinar seu comportamento para um determinado horizonte de tempo e condições.

As conexões de causalidade direta e inversa são representadas por S e O, onde S significa “*same*”, traduzindo para o português: “mesmo” e O significa “*opposite*” ou “oposto”. Estes significados também são denotados como + e –, respectivamente, na literatura. As realimentações negativas ou de Balanço ou de equilíbrio são representadas por B, que significa “*Balance*” ou “Equilíbrio” e as realimentações positivas ou de reforço são representadas por R, que significa “*Reinforcement*” ou “Reforço”. Duas retas paralelas sob o elo de ligação entre as variáveis representa a presença de atrasos [14].

A Figura 3.1 mostra um diagrama de ciclo causal reduzido para o mercado do café mundial, baseado em dados do mercado e dos gráficos da Figura 1.1. O principal modo de referência aparece no gráfico de estoques e preços, onde é observado uma correlação dos

dados tendenciado a -1 e apresentado comportamento oscilatório. Os ciclos B1 e B2 são os ciclos dominantes. Este modelo CLD foi elaborado no *software Vensim* [47].

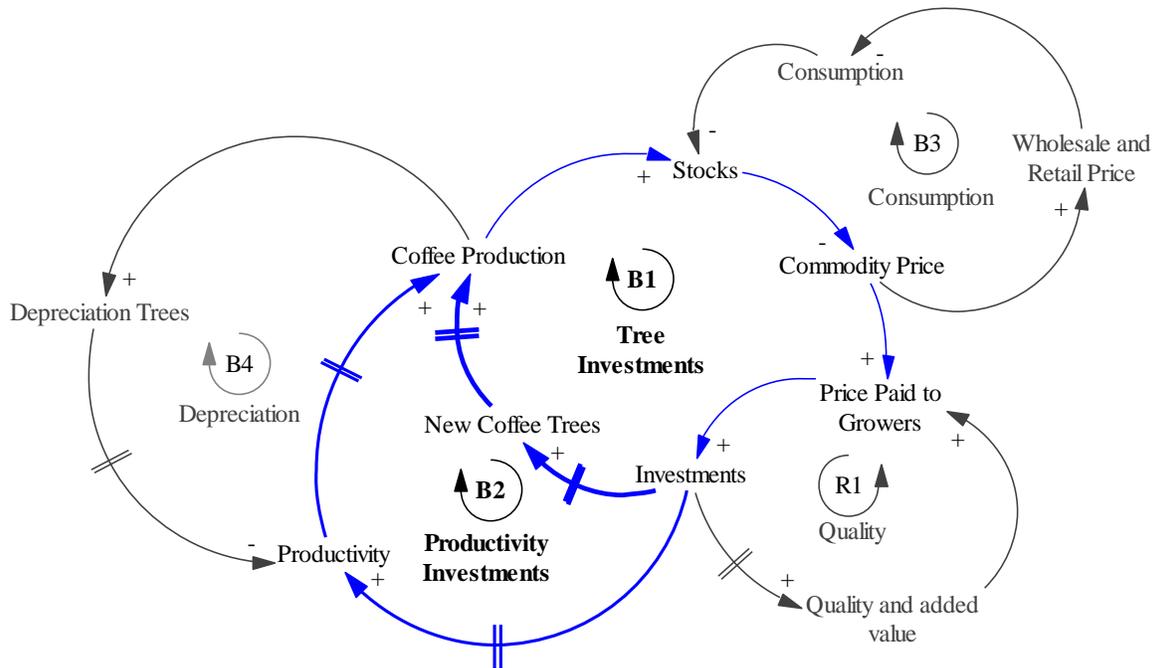


Figura 3.1 – Diagrama de ciclo causal do mercado do café mundial baseado na análise de gráficos e de outros dados do mercado. Fonte: Autor (2016).

3.3 Diagramas de estoques e fluxos

Um CLD descreve a estrutura do sistema qualitativamente, mostrando como diversas variáveis no sistema se relacionam. Entretanto, não fornecem informações sobre as relações quantitativas entre as variáveis. O diagrama de estoques e fluxos (SFD – *Stock and Flow Diagram*) captura os aspectos quantitativos do sistema ([42] e [14]).

Estoques e fluxos acrescentam níveis, descrevem as variações, as taxas e os atrasos. Os estoques são acumuladores das grandezas, definindo, portanto, propriedades de inércia ou memória ou, ainda, os estados dos sistemas. Os fluxos são taxas e variações de grandezas, definindo, portanto, derivadas de variáveis. Diagramas de estoques e fluxos são uma forma prática de gerar, alterar e analisar equações matemáticas, podendo ser diferenciais ordinárias ou parciais, estocásticas ou diferenças. Além disso, não-linearidades, variância e invariância no tempo e sistemas multivariados podem ser facilmente implementados ([42] e [14]).

Assumindo, como dito, que os ciclos B1 e B2 sejam dominantes, um possível modelo dinâmico para o mercado do café pode ser descrito como o seguinte:

- A variação dos estoques EST é dada pela diferença entre a taxa de produção TPR e a taxa de consumo TCO . Conforme Figura 1.1, TCO é crescente exponencial com consumo inicial CIN e constante de tempo de crescimento τ_c . As equações (3.1) e (3.2) descrevem esta hipótese. A variável tempo é representada pela letra t .

$$\frac{dEST}{dt} = TPR(t) - TCO(t) \quad (3.1)$$

$$TCO(t) = CIN * e^{\frac{1}{\tau_c} * t} \quad (3.2)$$

- A produção pode ser focada em compensar um estoque desejado $ESTD$, que seria limitado pela capacidade física de estocagem, por exemplo. Para os produtores, os estoques são capital de investimento, uma espécie de poupança, que é consumida durante o ano. Portanto, a produção precisa, no mínimo, repor o estoque cada ano ([27] e [32]). Entretanto, a produção é incentivada por bons preços do *commodity* que, como veremos adiante, apresenta um atraso T entre a decisão de investir (mais produtividade e lavouras) e de efetivamente produzir. Além disso, é esperado um tempo de ajuste da produção TAP aos estoques. Esta hipótese é descrita pela equação (3.3) ([17], [23] e [28]). Para este caso, supomos um estoque desejado constante. A produção, ainda, poderia conter uma parcela referente à compensação do consumo ou de uma estimativa de consumo [45].

$$TPR(t) = ESTD - \frac{EST(t) * f(preços(t - T))}{TAP} \quad (3.3)$$

- Por último, os preços reagem aos estoques, como visto no ciclo B1 do CLD da Figura 3.1, do qual vamos desconsiderar demais atrasos. Ou seja, vamos supor que os preços possam reagir imediatamente aos níveis de estoques. Reescrevendo a equação anterior, chegamos a equação (3.4).

$$TPR(t) = ESTD - \frac{EST(t) * f(g(EST(t - T)))}{TAP} \quad (3.4)$$

Logo, substituindo as equações (3.2) e (3.4) na equação (3.1), obtemos a equação (3.5) que representa o modelo dinâmico dos estoques mundiais.

$$\frac{dEST}{dt} = ESTD - \frac{EST(t) * f(g(EST(t - T)))}{TAP} - CIN * e^{\frac{1}{\tau_c} * t} \quad (3.5)$$

Então, desconsiderando as possíveis não-linearidades e variâncias no tempo da função $f(g(.))$ da equação (3.5), simplificando para ser simplesmente $EST(t - T)$, podemos reescrever a equação diferencial (3.5) como uma equação diferencial com atraso não-linear e variante no tempo, que é representada na equação (3.6).

$$\begin{cases} \frac{dEST}{dt} = -\frac{EST(t) * EST(t - T)}{TAP} + ESTD - CIN * e^{\frac{1}{\tau_c} * t} \\ EST(0^-) = \alpha; \forall t > 0; \end{cases} \quad (3.6)$$

A partir da equação do modelo dinâmico proposto é gerado o SFD mostrado na Figura 3.2 e o código *iThink/Stella* pode ser apreciado no Apêndice C.1.

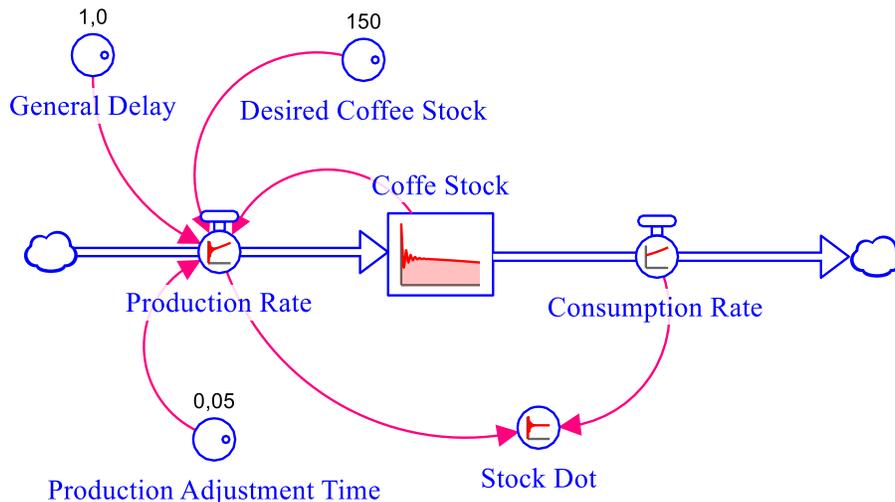
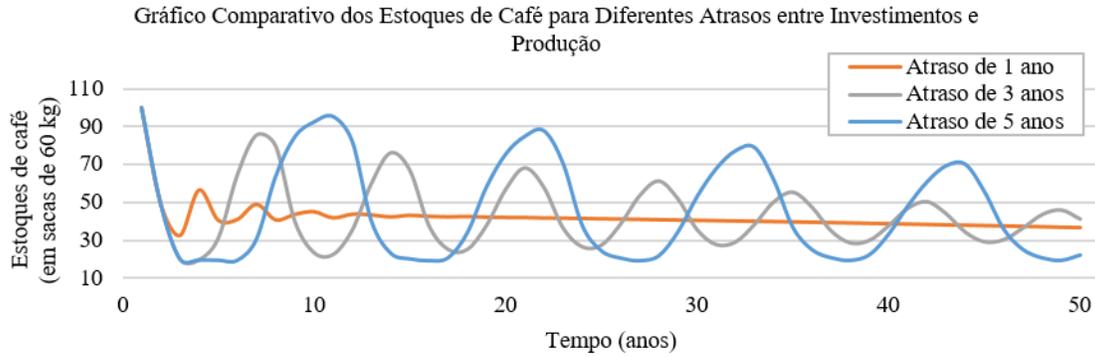
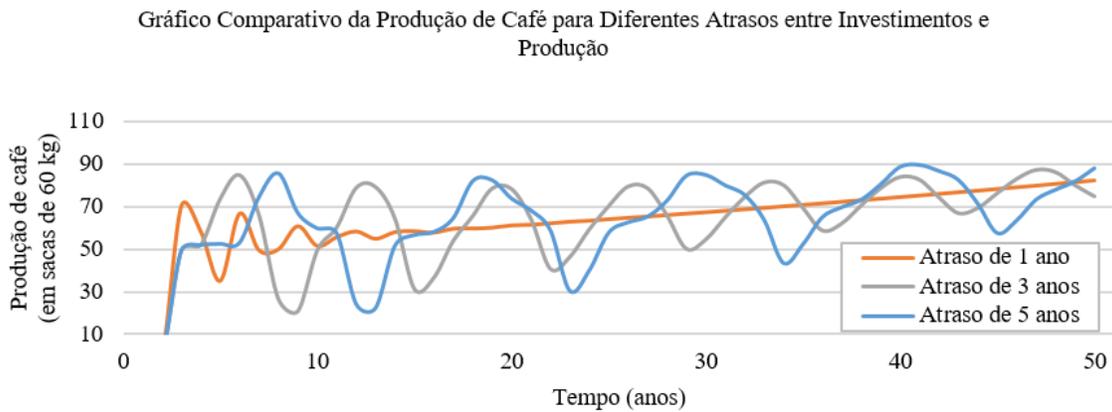


Figura 3.2 – SFD para um possível cenário descrito para o mercado do café mundial.

Os resultados das simulações, para a análise de três diferentes valores de atraso entre investimentos e aumento de produção ($T = 1, 3$ e 5 anos) e estoques iniciais de 100 sacas, podem ser vistos na Figura 3.3. É observado que o efeito do atraso é o aumento das oscilações nos estoques e nas produções e, conseqüentemente, nos preços. Além disso, a produção tende a acompanhar o crescimento do consumo.



(a)



(b)

Figura 3.3 – Gráfico dos resultados dos estoques (a) e das produções (b) para o cenário idealizado descrito na seção 3.3 de SFD para um horizonte de 50 anos. Fonte: Autor (2016).

3.4 Estruturas e comportamentos dos sistemas dinâmicos

Os comportamentos dos sistemas são função de sua estrutura, entradas e distúrbios. A estrutura consiste das realimentações, estoques e fluxos e não-linearidades criadas pelas relações entre as variáveis do sistema. Os comportamentos básicos são identificados através da análise das estruturas realimentadas que gerem eles. Esses modos incluem crescimento, criado por realimentações de reforço; rastreadores (“seguidor de metas” ou *goal seeking*), criado por realimentação de balanço; oscilações, incluindo oscilações amortecidas, ciclos limites, e caos, criadas por realimentações de balanço com atrasos. Outros modos mais complexos, como crescimento *S-shaped* e sobressinal e colapso, são resultantes de interações não-lineares das estruturas básicas [42]. A Figura 3.4 mostra os gráficos dos principais comportamentos.

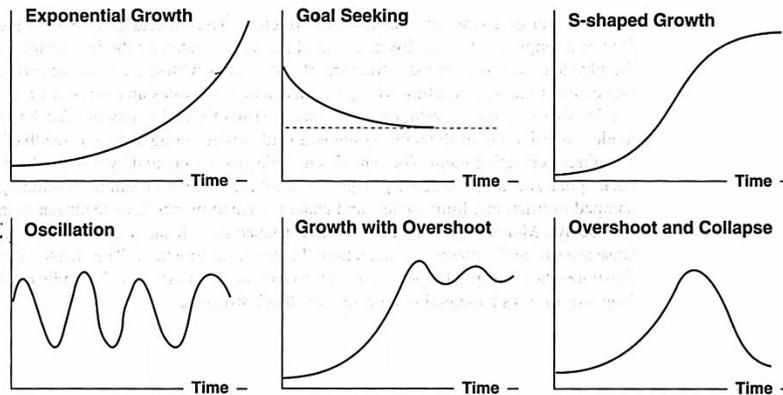


Figura 3.4 – Comportamentos básicos das estruturas. Fonte: Sterman [42].

A seção a seguir apresenta uma visão sobre a principal estrutura encontrada no mercado do café e seus comportamentos: oscilações.

3.4.1 Comportamento: oscilações

Este comportamento é causado quando há atrasos em ciclos de realimentação em balanço ou negativo, como o rastreador. O atraso pode estar presente em qualquer elo de conexão e basta que haja um atraso para gerar oscilações. São observados consecutivos e constantes sobressinais [42]. O comportamento de oscilador é observado nos gráficos de simulações da Figura 3.3 e também nos gráficos de estoques e preços da Figura 1.1, onde pode ser identificado um modo de referência do mercado do café.

Um exemplo de equação diferencial representativa é o oscilador linear com atraso, como mostra a equação (3.7).

$$\frac{dEstado}{dt} = Referência - Estado(t - Atraso) \quad (3.7)$$

O ciclo de realimentação negativo tende a levar o estado do sistema em direção à "meta", porém, por causa do atraso, a reação negativa ainda tenta movimentar o sistema na mesma direção. Isto faz com que o estado do sistema ultrapasse o objetivo. Então, o ciclo negativo procura compensar e trazer o estado para a meta, porém, novamente, o atraso desempenha o seu papel causando oscilações ([14] e [42]).

O CLD da Figura 3.5 representa a estrutura do sistema oscilatório. Uma importante característica, que pode aparecer nos comportamentos oscilatórios, é o amortecimento. Os

sistemas oscilatórios podem ser amortecidos ou não. Em sistemas amortecidos, um distúrbio é capaz de gerar as oscilações, mas o sistema tende a retornar ao equilíbrio em algum horizonte de tempo e em função do amortecimento. Este equilíbrio do sistema é dito localmente estável. Sistemas reais geralmente são não-lineares, o que significa que as realimentações e parâmetros do sistema variam com seu estado. Ser localmente estável significa que as perturbações precisam ser pequenas relativamente às não-linearidades para assegurar estabilidade, senão podem emergir outros comportamentos [42].

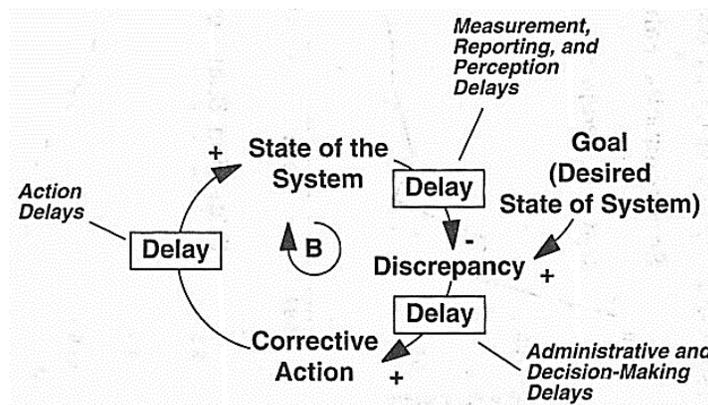


Figura 3.5 – CLD representativa da estrutura capaz de gerar comportamento oscilatório.
Fonte: Sterman [42].

Para determinados sistemas, realimentações positivas guiam trajetórias partindo dos pontos de equilíbrio instáveis para pontos distantes, porém elas que são limitadas por realimentações negativas e não-linearidades. Oscilações geradas neste tipo de sistema são chamadas de “ciclos limite”. Assim, no ciclo limite, o estado do sistema fica retido em uma região e, em regime permanente, os estados ficam em uma órbita fechada no espaço de estados. O ciclo limite (trajetória em órbita fechada) pode ser atrativo ou repulsivo para as trajetórias do sistema ([42] e [38]).

O mercado do café sugere ser amortecido, mas é constantemente bombardeado por distúrbios. Sua estrutura oscilatória é formada por várias realimentações negativas, onde os produtores, voluntariamente ou não, ajustam suas produções e estoques com atrasos diversos reagindo as mudanças das demandas, dos preços e dos estoques. Muitas irregularidades são geradas por choques randômicos como as alterações climáticas que causam quebra de produção ou favorecem muito a ponto de gerar superproduções [42].

3.5 Mercado de *commodity* agrícola: cadeia de suprimentos e a origem das oscilações

O setor de distribuição e negócios do mercado do café é uma cadeia de suprimentos responsável por entregar aos consumidores o *commodity* desejado no tempo desejado. O sistema é composto pelos processos de estoque e fluxo para a aquisição, armazenamento e conversão das entradas, o que corresponde a estrutura de gerenciamento de estoques, e pelas políticas e estratégias de negócio com influência dos governos. A origem das oscilações está nas realimentações negativas com substanciais atrasos e nas estratégias de decisão falhas, que não são capazes de compreender o sistema como um todo, como visto nas seções anteriores [42].

No caso do *commodity* do café, as realimentações negativas são predominantes e estão presentes nos ciclos de investimentos passando pela decisão de plantar, aplicar cuidados nas lavouras incluindo podas, crescimento das árvores e eliminação de árvores. O mesmo ocorre na fase de beneficiamento como beneficiar, secar e estocar as sacas de café e na comercialização, incluindo os serviços de torrar e exportar. Todas estas etapas possuem atrasos das saídas e muitas não podem ser minimizadas ou controladas. Além disso, a cadeia de suprimento é composta por vários tipos de produtores e várias empresas independentes.

Em toda a estrutura do mercado do café e nos dados disponíveis podem ser observadas três características principais: oscilações, ampliações e atrasos de fase, como no exemplo da seção 3.3 e nos dados do capítulo 2.

3.5.1 Estrutura de gerenciamento de estoques

Os controles de estoques podem ser divididos em duas partes: estoque e fluxo de material pela cadeia de suprimento e as regras de decisão para aquisição, armazenamento e saída de materiais. Os estoques *EST* a serem controlados são o acúmulo entre a taxa de aquisição *TA* e a taxa de saída ou perda *TS*. Taxas de saídas ou perdas são função de várias outras variáveis endógenas *VEN* e exógenas *VEX*, tais como o próprio estoque, depreciações, consumos, custos, etc. Estas taxas podem apresentar não-linearidades e podem depender da idade do estoque, como o café. As taxas de aquisição podem depender dos atrasos de aquisição, taxas de produção, consumos, variações dos estoques, contratações, uso de

equipamentos, em suma, das restrições da capacidade de produção e uso desta capacidade. Num contexto geral, deve ser mensurado uma taxa de aquisição desejada TAD . A taxa de aquisição desejada é capaz de capturar as tomadas de decisão dos gestores. As equações de (3.8) a (3.10) descrevem as relações acima.

$$EST = \int (TA - TS) dt, \quad EST_{t_0}. \quad (3.8)$$

$$TS = MAX(0, f(EST, VEN, VEX)) \quad (3.9)$$

$$TA = MAX(0, TAD) \quad (3.10)$$

A função $MAX(.)$, expressada nas equações (3.9) e (3.10), defini que as taxas TS e TA devam ser o máximo entre 0 e $f(.)$ e entre 0 e TAD , ou seja, não existe sentido físico obter taxas TS e TA negativas. Para definir TAD , que pode contar com as mais variadas regras e otimizações, duas considerações importantes são feitas: (i) os gestores devem repor as baixas dos estoques, promovendo o ajuste dos estoques $AEST$ aos níveis desejados e (ii) devem calcular as taxas de saídas ou perdas estimadas TSE . A equação (3.11) descreve TAD .

$$TAD = TSE + AEST \quad (3.11)$$

O ajuste do estoque $AEST$ cria um ciclo linear de realimentação negativa de controle conforme a equação (3.12).

$$AEST = \frac{ESTD - EST}{TAEST} \quad (3.12)$$

Sendo $ESTD$ é o estoque desejado, que pode ser constante ou variado, e $TAEST$ é o tempo de ajuste do estoque.

Este esquema de gerenciamento de estoques causa mudanças importantes na cadeia de suprimento, principalmente quanto à razão de amplificação (razão entre máxima mudança da saída e da entrada), embora a razão possa ser modificada pelo aumento do tempo de ajuste dos estoques [42]. Aliás, aumentar o tempo de ajuste de estoques de café é uma das soluções propostas por Laignelet em 1976 [27], conforme equação (2.1).

3.5.2 Estrutura genérica dos mercados de *commodity*

A Figura 3.6 mostra uma estrutura genérica para o mercado de *commodity*, que é proposta por Sterman [42], e que foi referenciada nesta dissertação. Este modelo geral descreve a capacidade de produção, linha de suprimento, formação de estoques e as regras de mercado e consumo.

Para o mercado do café, é identificado a capacidade de produção como correspondente as lavouras e suas peculiaridades. A iniciação da capacidade refere-se a taxa de plantios e regeneração de lavouras e a capacidade perdida refere-se a taxa de eliminação de plantas. A linha de suprimento contempla a fase de beneficiamento, onde a dita taxa de início de produção, na verdade, corresponde a taxa de colheita e a taxa de produção, em suma, é a taxa de entrega de sacas de café nos armazéns. Como vimos na seção 2.3.1, a capacidade de utilização é de 100% [35]. A linha de suprimento, em muitos casos, adiciona janelas de atrasos na estrutura de gerenciamento de estoques. A taxa de consumo do modelo geral é descrita pela soma dos consumos domésticos (torrefadoras) e pelas taxas de exportação (As importações de café no Brasil são desconsideradas por serem pouco expressivas). Os estoques de sacas e estoques de cobertura, que são função das taxas de produção (entregas nos armazéns) e dos consumos, são os principais agentes geradores de preços. Por fim, os preços movem várias expectativas e estimativas que realimentam as capacidades de produção e produções.

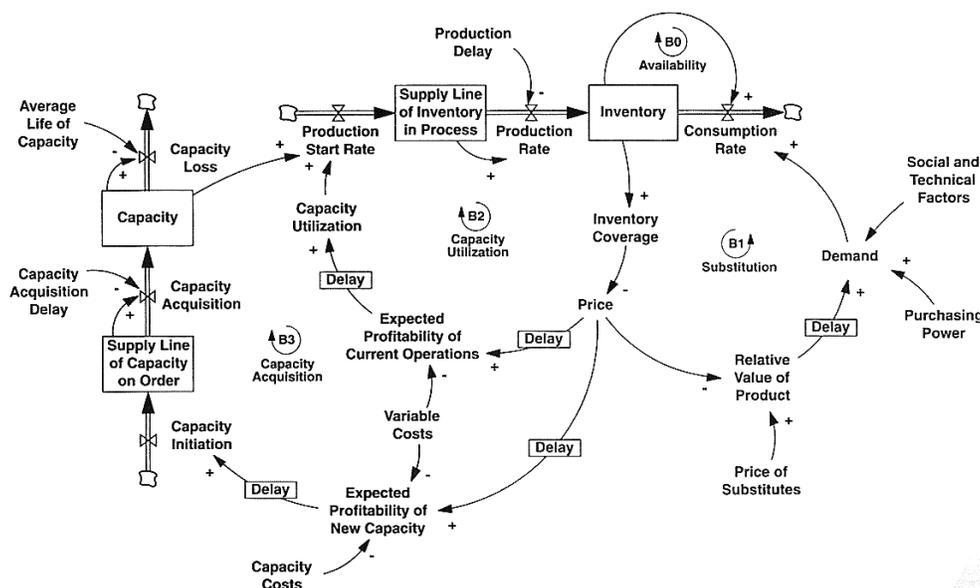


Figura 3.6 – Estrutura genérica dos mercados de *commodity*. Fonte: Sterman [42].

Quando a entrada e a saída dos sistemas diferem de um atraso, a diferença é acumulada em algum tipo de estoque em trânsito (material ou informação). Atraso de tempo entre ações de correção e seus efeitos criam linhas de suprimento de correções, que levam a impactos e que podem gerar oscilações. No mercado do café, como visto, muitos desses atrasos não podem ser manipulados ou controlados. Contudo, é possível controlar os níveis de correções de algumas variáveis para se evitar as oscilações ou minimizá-las. Entretanto, em muitos casos, os gestores continuam aplicando correções devido às discrepâncias identificadas mesmo quando as correções já foram suficientes.

Neste capítulo vimos os principais conceitos de SD e as principais ferramentas como o CLD e o SFD, além de analisar o sistema dinâmico do mercado do café a partir dos modos referenciados que indicam comportamentos oscilatórios. Também foram estudadas as características das cadeias de suprimentos, as principais equações matemáticas e as origens dessas oscilações. Por fim, vimos o principal SFD desenvolvido para *commodities*, postulado por Sterman [42], denominado diagrama da estrutura geral de mercado de *commodities*. Este SFD foi explicado sob a ótica do mercado do café.

Capítulo 4

Modelagem qualitativa do mercado do café utilizando dinâmica de sistemas (SD)

Após ter realizado a investigação empírica da economia e dinâmica do café brasileiro e mundial para longos horizontes de tempo, efetuando o detalhamento e a estimação de dados econométricos, principalmente devido à falta de informações diversas, foram definidas as principais variáveis de trabalho, modos de referência, hipóteses dinâmicas e diagramas de causa-efeito. Neste capítulo, os conceitos descritos no diagrama da Figura 3.1 e as fundações estruturais relacionadas as dinâmicas de preços e estoques através do mercado serão expandidas e aprimoradas. O conceito de focar a modelagem no problema e não no sistema, conforme afirma Sterman [42], foi seguido.

Os fundamentos da economia clássica tratam das interações de preços, suprimento e demanda com modelos estáticos, onde são discutidos os pontos de equilíbrio de mercado, mas não as dinâmicas em torno desses pontos. Questões como os efeitos de grandes excedentes, escassez ou aversão à escassez, estoques inadequados, atrasos de resposta de variáveis, elasticidades das variáveis de mercado e outras não-linearidades não são analisadas normalmente [49]. No mercado de *commodity* agrícola, em especial o café, é observado que a produção não pode ser controlada conforme a demanda ou os estoques, pelo menos em curto prazo, além de atuação forte de fatores externos como alterações climáticas.

O mercado do café apresenta principalmente ciclos de realimentação negativa ou de balanço com longos atrasos de resposta de algumas variáveis. Este comportamento gera oscilações das variáveis de estado e, sob certas circunstâncias, a instabilidade da dinâmica do mercado. Para o mercado do café, isso significa mais frequentes alternâncias de preços e estoques mundiais, em níveis possivelmente mais baixos e mais altos.

O mercado do café é afetado por várias variáveis exógenas [22], mas neste capítulo serão abordadas as mais significativas para o Brasil na atualidade, que são as alterações climáticas, os preços dos outros *commodities* e as variações cambiais.

4.1 Hipóteses dinâmicas e modos referenciados: suprimentos

A Figura 4.1 mostra o CLD para as relações entre os produtores e as movimentações dos preços do café (cotações internacionais dos diferentes grupos de café, preços físicos (*spot price*) e dos contratos futuros, preços locais e preços pagos aos produtores) com as principais realimentações, atrasos e variáveis exógenas.

O ciclo B1 dos investimentos em lavouras retrata a ação dos preços na tomada de decisão dos produtores em plantar e recuperar suas lavouras, renovando o capital de investimento. Altos/baixos preços encorajam/desencorajam os produtores a plantar e podar, o que leva ao aumento/diminuição dos estoques de árvores em formação e, conseqüentemente, árvores produtivas com atraso (na verdade, os atrasos mais extensos de todo o mercado). Altos/baixos preços desencorajam/encorajam a eliminação de plantas obsoletas. Com um determinado atraso, observa-se o aumento/diminuição de produção [46].

Plantação e padrões de poda e cuidados (como adubação) dependem dos movimentos dos preços, das expectativas dos preços e dos mercados futuros [32]. Estes investimentos possuem diferentes tempos de retorno, mas, em média, novas lavouras e produtividade aparecem com 4 anos de atraso, como visto no capítulo 2. Inclusive, a presença de histerese é observada como visto com a plantação e a eliminação de árvores em função dos preços (existe um comportamento com a alta de preços e outro com as baixas) [32].

Então, descontado o consumo doméstico, temos as taxas de produção exportável que, na prática, integram os estoques brutos. Dos estoques brutos são descontadas as exportações de café. Os movimentos de alta/baixa (excedentes/escassez) dos estoques brutos mundiais, combinado com os demais tipos de estoques (cobertura, por exemplo) que formam a disponibilidade de produtos, implicam em baixa/alta de preços. Os movimentos dos preços (todos os tipos) dependem dos estoques mundiais que vão depender dos preços novamente [32].

Um efeito não-causal pode ser visto ainda no ciclo B1 que é o efeito da expectativa ou estimativa de produção dos anos seguintes, que implicam em expectativa de mais ou menos estoques e disponibilidade, na comercialização dos preços dos contratos futuros negociados nas bolsas diariamente. Este fato interfere na decisão dos produtores/exportadores de vender seus estoques para capitalizar e liberar armazéns.

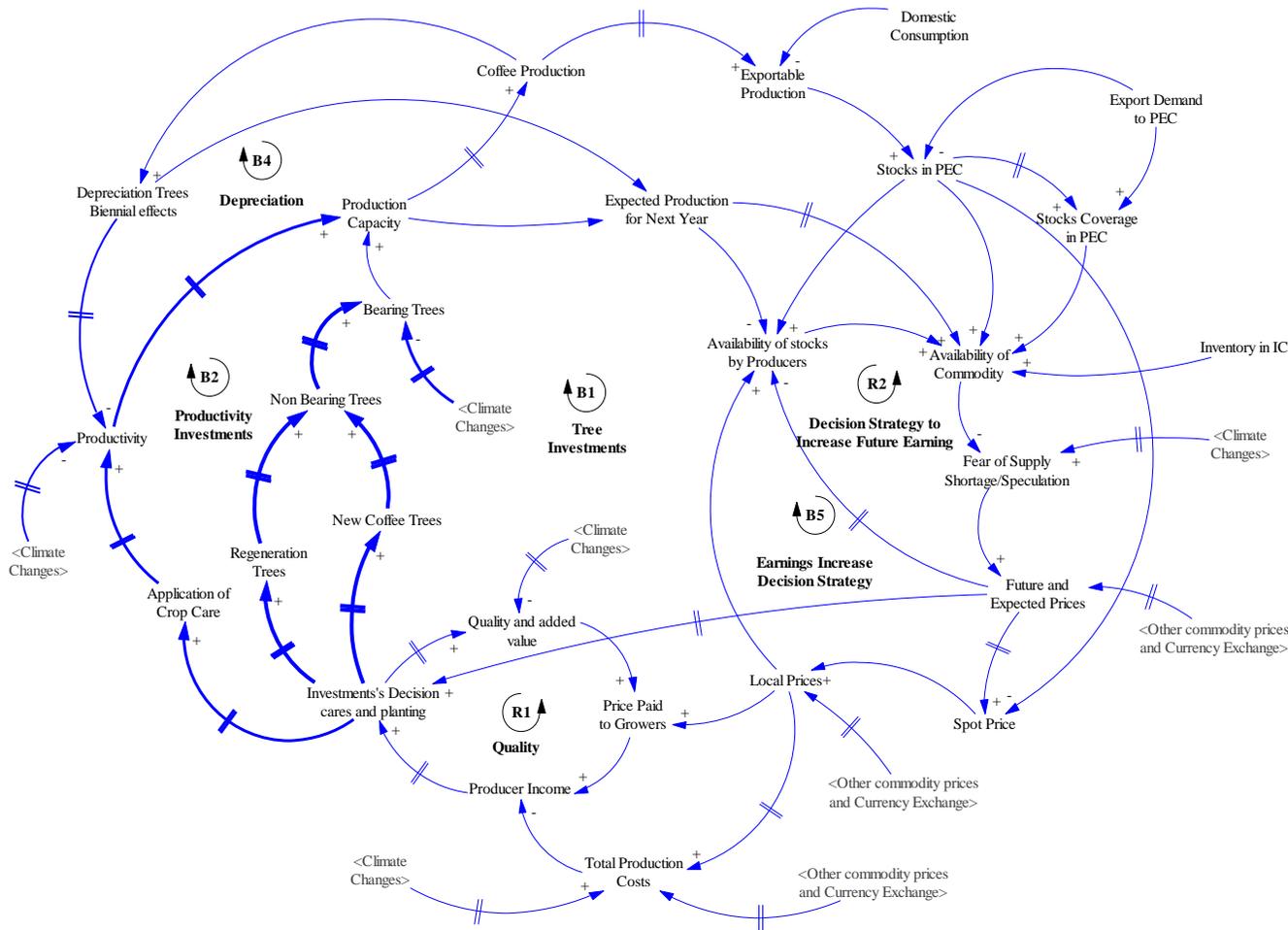


Figura 4.1 – CLD criado a partir das hipóteses dinâmicas envolvendo a produção e a formação de preços do café.

Nota: - PEC significa países produtores e exportadores de café (*Producing and Exporters Countries*).

- IC significa países importadores (*Importing Countries*).

- O plantio e cuidados possui uma relação causal com o rendimento dos produtores. Entretanto, com a análise estatística dos dados de rendimentos não foi possível identificar alguma relação bem definida. Contudo, foi possível determinar uma relação bem-comportada entre a porção de lavoura em formação e a produtividade com os preços pagos aos produtores.

- A variável disponibilidade de *commodity* pode ser associada ao cálculo das relações (razões) de suprimento e demanda, onde são determinados excedentes e escassez que influenciam nos preços.

O ciclo B2 é um complemento do ciclo B1 e representa o aumento/diminuição de investimentos em cuidados (adubações, irrigação, capina, etc.) que levam a aumento/diminuição de produtividade com atrasos menores.

O ciclo B4 trata dos efeitos de desgaste das lavouras devido às altas taxas de produção, a bianualidade. Na verdade, a proporcionalidade dos desgastes é ligada a variação de produções de anos consecutivos.

O ciclo B5 trata da decisão de dispor os estoques à venda, como dito no ciclo B1. Os produtores ponderam preços locais e preços futuros (ou expectativa de preços), estoques e expectativa de produção, quanto às alterações do ciclo produtivo, para dispor seus estoques e se capitalizar. Normalmente, os estoques tendem a reduzir mais próximo da chegada das grandes colheitas. Mais disponibilidade leva a menores preços que leva a menores disponibilidades que leva a maiores preços ([28] e [45]).

O ciclo de reforço R1 trata do ganho de qualidade dos cafés. Quanto mais preços, mais os produtores têm receitas, mais investe na lavoura, mais qualidade e mais valorização dos cafés.

O ciclo R2 de reforço trata novamente da ação dos preços locais (à vista) e futuros. Mais disponibilidade leva a menores preços futuros, que diminui a expectativa dos produtores, que dispõem mais dos estoques para aproveitar os preços à vista, que aumentam a disponibilidade que tendem a diminuir mais os preços futuros. O ciclo B5 e R2 são mais complexos de serem analisados com dados de mercado. Os pequenos produtores vivem focados nas altas dos preços e vendem seus estoques quando necessitam de capital por razões diversas.

No CLD da Figura 4.1 podem ser observadas as principais variáveis exógenas e suas principais ações. Alterações climáticas levam a expectativa de diminuição de capacidade produtiva, produção e qualidade dos grãos e tendem a impactar nos preços futuros elevando-os. Se estas expectativas se confirmam, com um atraso de 6 meses a 1 ano aproximadamente, os preços se firmam mais altos e, assim, criam-se as expectativas de uso dos estoques de café e de tempo de recuperação das lavouras. A desvalorização da moeda (taxa de câmbio) tende a proteger os produtores uma vez que o café fica mais barato no mercado internacional e se exporta mais. Entretanto, os efeitos do câmbio refletem também nos insumos e os custos tendem a subir junto. Os danos podem ser desastrosos se a desvalorização cambial for em

cenário de crise, como em 2015 e 2016, elevando os preços nacionais, aumentando as exportações, instigando ao aumento da capacidade produtiva quando, na verdade, os mercados internacionais seguem em queda de preços. Tal cenário está presente na Figura 1.3.

Para o desenvolvimento do modelo qualitativo, os modos de referência para os estoques de árvores (em formação e produtivas) são os comportamentos identificados nos gráficos da Figura 2.1. Os modos para a produção e produção exportável estão na Figura 2.2 e Figura 2.14. Para os estoques de café verde são adotados os modos da Figura 2.20, porém será considerada a estimativa de estoques totais e não o publicado como de passagem. Para as colheitas os modos estão na Figura 2.8.

Todos os tipos de preços apresentam forte correlação positiva com tendência à +1, mas os preços locais e pagos aos produtores podem variar mais de acordo com a região produtora. Os preços cotados internacionalmente, que reagem aos estoques e produções mundiais, apresentam um atraso de 2 a 3 meses, na média, em relação as expectativas de preços e variação de preços dos contratos futuros também negociados nas bolsas. As expectativas de preços e os preços dos contratos futuros (cotados diariamente) reagem mais rapidamente aos agentes causadores de alterações, de temor de escassez (principais fontes de especulação), e transmitem estas reações aos preços internacionais. Por isso, inclusive, os preços dos contratos futuros apresentam maior volatilidade quando comparados aos físicos (*Spot Price*) [22]. Os modos de referência para os preços internacionais à vista (ou físicos) e dos contratos futuros são os gráficos das Figura 2.10 e Figura 1.1.

Toda esta dinâmica de mercado indica que políticas podem ser difíceis de desfazer, como destruir estoques para encorajar os preços e a produção, como já ocorreu no passado do Brasil.

4.2 Hipóteses dinâmicas e modos referenciados: demandas

A Figura 4.2 mostra o CLD entre as demandas, consumo doméstico e exportações e as movimentações dos preços (cotações internacionais dos diferentes grupos de café, preços físicos (*spot price*) e dos contratos futuros, preços locais e preços pagos aos produtores).

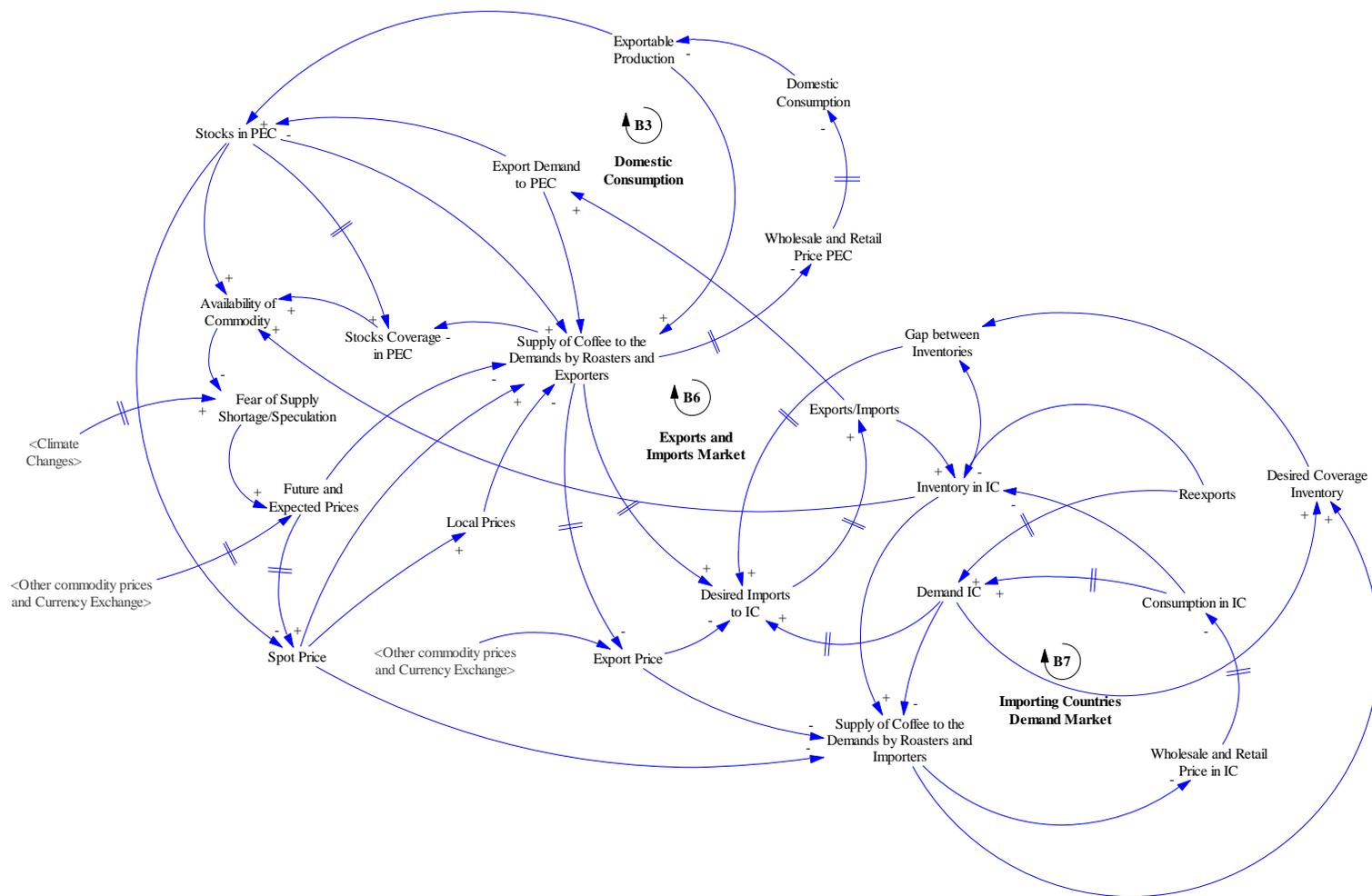


Figura 4.2 – CLD criado a partir das hipóteses dinâmicas envolvendo as demandas e a formação de preços do café.

Nota: - PEC significa países produtores e exportadores de café (*Producing and Exporters Countries*).

- IC significa países importadores (*Importing Countries*)

- A variável disponibilidade de *commodity* pode ser associada ao cálculo das relações (razões) de suprimento e demanda, onde são determinados excedentes e escassez que influenciam nos preços.

O ciclo B3 é o ciclo dos consumos domésticos. Quanto mais os preços no atacado e varejo barateiam (produtos derivados dos *commodities*), mais os consumidores aumentam seus consumos. Quanto mais caro, mais os consumidores procuram substitutos do café ou, simplesmente, consomem menos. O aumento de consumo leva a diminuição de excedentes para exportação e a menos estoques, que implicam em elevação de preços (passando pelos mercados futuros). Preços dos *commodities* mais caro levam a preços de varejo mais caro, passando pela regulação e controle das torrefadoras, onde pode aparecer alguns atrasos e influências de outras variáveis como inflações [23].

O ciclo B6 é o ciclo dos mercados de exportação e importação. Os mercados importadores definem suas demandas de exportação aos países produtores. Quanto mais se exporta, menos estoques são registrados nos produtores, menos disponibilidades (que incluem os estoques dos países produtores e importadores) são registradas e mais os preços internacionais tendem a reagir elevando. As importações e preços de varejo e atacado são definidos pelas torrefadoras e importadores dos países consumidores, que tendem a repassar os preços internacionais para o consumo. Quanto mais caro o café no varejo, menos consumo pela população ou mais procura-se por substitutos. Quanto menos consumo, mais estoques nos países importadores e mais aumenta a diferença com relação aos estoques desejados, que levam a mais ou menos importações (depende dos níveis desejados) ([22] e [23]).

O ciclo B7 é o ciclo de consumo de café nos países importadores. Como visto, as torrefadoras definem os preços do varejo e atacado e, normalmente, repassam os valores dos mercados internacionais. Produtos baratos elevam o consumo e tentem a diminuir os estoques. Estoques baixos implicam em ajustes para atender à demanda que leva os preços a níveis mais caros.

Por último, mas não menos importante, temos uma variável considerada exógena que é a reexportação. Esta demanda atua no sentido de diminuir os estoques e impulsionar as importações dos países importadores e, portanto, impulsionar as exportações dos países produtores.

Os modos referenciados para os comportamentos dos estoques dos países importadores podem ser vistos na Figura 2.4. Para os consumos domésticos e consumos dos países importadores são adotados os modos da Figura 2.3. Os modos para as taxas de exportação e reexportação estão nos gráficos da Figura 2.13, Figura 2.15 e Figura 2.16.

Neste capítulo foi proposto um modelo dinâmico qualitativo descrito por diagramas de ciclo causal para todo o mercado do café mundial, embora alguns aspectos do mercado brasileiro foram incorporados ao modelo, como os efeitos de depreciação das lavouras por excesso de produção. A princípio, as lavouras de outros países também apresentam esta depreciação, embora não seja tão visível tal fenômeno nas produções. Este modelo macroeconômico se faz necessário para a correta compreensão das relações econômicas e para o desenvolvimento do modelo qualitativo, que é ajustado para os valores do mercado brasileiro.

Capítulo 5

Modelagem quantitativa do mercado de café utilizando equações diferenciais

O comportamento dinâmico do mercado do café pode ser modelado quantitativamente mediante a análise de sua estrutura interna e dos distúrbios exógenos. A estrutura interna consiste de um conjunto de ciclo de reforço e balanço que descrevem cadeias fechadas de causas e efeitos como já visto no capítulo 4 [27].

As seções a seguir visam a modelagem quantitativa dos principais elementos que compõem a cadeia de suprimentos do café brasileiro. Do CLD da Figura 4.1, que trata dos suprimentos, foi modelado a influência dos preços e preços pagos aos produtores até a formação dos estoques brutos. Do CLD da Figura 4.2, que trata das demandas, foi modelado a influência dos preços, passando pelas torrefadoras e exportadores, até os estoques brutos. O suprimento é formado pela capacidade de produção, produção e estoques de café verde, e a demanda é formada pelo consumo doméstico e pelas exportações.

A formação dos preços, que são endógenos, não foi modelada neste trabalho, pois os preços são função dos movimentos das principais variáveis mundiais (estoques e produções de café) e não só do mercado brasileiro. Por isso, não será estudada a dinâmica dos diferentes preços. Nas simulações, que são apreciadas no próximo capítulo, são adotadas séries temporais históricas e estimações de preços para análise do modelo proposto.

Os preços (Indicador ICO) apresentam grande correlação estatística com os preços pagos aos produtores, com tendência a +1 e sem atrasos. Por isso, para a estimação dos demais valores faltantes, para a simplificação das dinâmicas, os preços pagos aos produtores foram calculados mediante regressão linear simples a partir do indicador composto de preço ICO (*ICO Composite Price*).

Como o objetivo deste trabalho é focado na cadeia de suprimentos do Brasil, não são modeladas também as dinâmicas dos países importadores, nem as dinâmicas dos mercados futuros. Algumas variáveis são entradas exógenas, tais como as alterações climáticas,

tendência de consumos domésticos e tendência de exportações (baseado nos consumos dos países importadores e suas reexportações).

A Tabela 5.1 abaixo contém as principais variáveis do modelo dinâmico desenvolvido.

Tabela 5.1 - Nomenclatura das Variáveis

Sigla	Significado
Variáveis independentes	
t	Tempo (meses)
n	Tempo (anos)
Variáveis Exógenas	
$EFACE$	Efeito das alterações climáticas (Brando) nos estoques de árvores (adimensional)
$EFCALE$	Efeito dos cuidados aplicados às lavouras nos estoques de árvores (adimensional)
$EFACBI$	Efeito das alterações climáticas na bianualidade do café (adimensional)
$TAPAC_1$	Taxa de árvores perdidas do $EAPC$ devido às alterações climáticas (árvores/mês)
$TAPAC_2$	Taxa de árvores perdidas do $EAPD$ devido às alterações climáticas (árvores/mês)
$TARAC$	Taxa de árvores replantadas devido às alterações climáticas (árvores/mês)
$TRAAC$	Taxa de recuperação de árvores devido alterações climáticas (árvores/mês)
DOC	Taxa de consumo doméstico (sacas/mês)
$TTDINT$	Tendência de taxa de demanda (consumo) de café internacional (sacas/mês)
Variáveis endógenas	
$PFIS$	Preço físico do café (<i>ICO Composite price</i>) ($USCents/lb$)
PPP	Preços pagos aos produtores ($USCents/lb$)
$PFISEST$	Preços físicos estimados ($USCents/lb$)
TPA	Taxa de plantio de árvores (árvores/mês)
TAM	Taxa de árvores maturadas (árvores/mês)
$TAPD$	Taxa de árvores com produtividade em declínio (árvores/mês)
TAR	Taxa de árvores regeneradas (árvores/mês)
$TANP$	Taxa de árvores não-produtivas (árvores/mês)
$TRANP$	Taxa de recuperação de árvores não-produtivas (árvores/mês)
$TDANP$	Taxa de descarte de árvores não-produtivas (árvores/mês)
$TCOL$	Taxa de colheita de café (sacas/mês)
$TRECE$	Taxa de recebimento de café pelos estoques (sacas/mês)
$TATOR$	Taxa de aquisição de café verde das torrefadoras (sacas/mês)
$TATORD$	Taxa desejada de aquisição de café verde das torrefadoras (sacas/mês)
$TAEXP$	Taxa de aquisição de café verde dos exportadores (sacas/mês)
$TPEXP$	Taxa de Produção exportável de café verde (excedente ou escassez) (sacas/mês)
$TDEXP$	Taxa de demanda de exportação de café (sacas/mês)
$CODEST$	Taxa de consumo doméstico estimado (sacas/mês)
$DEXPEST$	Taxa de demanda de exportação estimada (sacas/mês)
EAC	Estoque de árvores em fase de crescimento (árvores)
$EAPC$	Estoque de árvores com produtividade crescente (árvores)
$EAPD$	Estoque de árvores com produtividade em declínio (árvores)
EAR	Estoque de árvores em processo de regeneração (árvores)
$EANP$	Estoque de árvores não-produtivas (árvores)
EAF	Estoque total de árvores em processo de formação (árvores)
EAP	Estoque total de árvores em produção (árvores)
BEN	Estoque de café em beneficiamento (trabalho em progresso) (sacas)
EB	Estoques brutos de café verde (sacas)
ETO	Estoques de café das torrefadoras (sacas)
$EEXP$	Estoques de café dos exportadores (sacas)
$ETOD$	Estoques desejados de café das torrefadoras (sacas)
$EEXPD$	Estoques desejados de café dos exportadores (sacas)

$PMAPC$	Produtividade média das árvores com produtividade crescente (sacas/ano/pé)
$PMAPD$	Produtividade média das árvores com produtividade em declínio (sacas/ano/pé)
$PAPC$	Produtividade das árvores com produtividade crescente (sacas/ano/pé)
$PAPD$	Produtividade das árvores com produtividade em declínio (sacas/ano/pé)
$EFACP$	Efeito das alterações climáticas nas produtividades das árvores (adimensional)
$EFCALP$	Efeito dos cuidados aplicados às lavouras nas produtividades (adimensional)
$CPAPC$	Capacidade de produção das árvores com produtividade crescente (sacas/mês)
$CPAPD$	Capacidade de produção das árvores com produtividade em declínio (sacas/mês)
CPT	Capacidade de produção total (sacas/mês)
$CPTe$	Capacidade de produção total efetiva determinada nos meses de março de cada ano (sacas)
Parâmetros	
ppp_{med}	Preço médio pago aos produtores para o período de tempo considerado ($USCents/lb$)
ppp_{ref}	Preço de referência pago aos produtores para o período de tempo considerado ($USCents/lb$)
$pfis_{ref}$	Preço físico de referência para o período de tempo considerado ($USCents/lb$)
a	Valor máximo da função logística
b	Valor mínimo da função logística
k	Declividade da curva da função logística
$f_{biamual}$	Fator de desgaste das lavouras de café (bianualidade) (adimensional)
T_1	Atraso inerente ao processo de plantio (meses)
T_2	Atraso devido ao processo de maturação (meses)
T_3	Atraso para chegar a ter produtividade da planta em declínio (meses)
T_4	Atraso para chegar a fase não-produtiva (meses)
T_5	Atraso para recuperação de árvores não-produtivas (meses)
T_6	Atraso para ajuste da produtividade à alteração de preços (meses)
T_7	Atraso de beneficiamento do café cereja (meses)
T_8	Atraso de efeito dos preços nas taxas de demanda de exportação (meses)
T_9	Atraso de efeito da produção exportável nas demandas de exportação (meses)
T_{ano}	Definição de ano de 12 meses (meses)
$netoc$	Níveis de estoques de cobertura de café das torrefadoras (meses)
$neexp$	Níveis de estoques de cobertura de café dos exportadores (meses)
$taetor$	Tempo de ajuste de estoques das torrefadoras (meses)
$taexp$	Tempo de ajuste de estoques dos exportadores (meses)
$efpexp$	Relação de proporção de efeito da produção exportável nas demandas de exportação (adimensional)

5.1 Capacidade de produção

A capacidade de produção de café é o componente da cadeia de suprimento que possui o maior tempo de resposta do mercado. Isso porque a capacidade é limitada aos estoques de árvores produtivas. Como vimos, o ciclo de vida produtiva das árvores é de 30 a 40 anos, onde árvores recém-plantadas ou podadas levam, em média, 4 anos para chegar ou voltar a idade produtiva. A capacidade de produção pode ser calculada a partir da estimação dos estoques de árvores de café e da estimação das produtividades das plantas [32].

Laignelet [27] e Velasquez [46] criaram modelos dinâmicos para os estoques de árvores. Outros autores consideraram os estoques de árvores, mas não realizaram modelagens dinâmicas. Mehta *et al.* [32] focou seus cálculos para um horizonte de cinco anos

considerando o plantio e a depreciação das árvores. Gelb [18] também gerou um modelo, porém linear em torno do ponto de operação, onde suprimentos ofertados são iguais as quantidades demandas.

Neste trabalho, foi considerado a evolução da produtividade das árvores de café com sua idade, como abordado na seção 2.2, para classificar estoques de árvores como: árvores em crescimento, árvores com produtividade crescente, árvores com produtividade em declínio, árvores em processo de regeneração e árvores não-produtivas. Além disso, é utilizado a forma padrão de definição de estoques de árvores como já empregado pelo setor cafeeiro, que são estoques de árvores produtivas e em formação.

Os tópicos tratados a seguir visam a modelagem da capacidade de produção de café brasileiro de acordo com o que foi descrito nos capítulos anteriores.

5.1.1 Taxa de plantio de árvores de café

Muitos efeitos relacionando parâmetros e variáveis foram descritos através da função logística (sigmoide ou curva em “S”). A razão da escolha desta função para representar efeitos se deve às hipóteses dinâmicas, aos modos referenciados descritos e a facilidade para determinar os parâmetros da função de forma a ajustar com os dados históricos. Os parâmetros escolhidos levam a diferentes curvas “S” que podem expressar características tais como: comportamento do plantio para preços em queda e comportamento do plantio para preços em ascensão (comportamentos típicos de faixas de histerese). Estas e outras não-linearidades podem ser consideradas mediante o correto ajuste dos parâmetros da função. Além disso, o uso da função logística é proposto em substituição ao uso das funções gráficas (*graphical function*), que podem dificultar o uso de algoritmos de otimização e elevar muito o número de parâmetros.

As famílias de funções logísticas são as soluções de equações diferenciais não lineares de primeira ordem como na forma apresentada na equação (5.1). Uma aplicação típica da equação logística é um modelo de crescimento populacional, sendo que a taxa de reprodução é proporcional à população existente e à quantidade de recursos disponíveis. Nas equações (5.3) e (5.4), k define a taxa de reprodução e x_0 o ponto médio da função logística. A função logística foi utilizada por Osorio [35] e Velasquez [46] para determinar o efeito das

expectativas dos preços sobre o estoque de árvores desejados pelos produtores. Aplicação semelhante foi dada pela primeira vez para o mercado de *commodity* por Meadows [31].

$$\frac{df(x)}{dt} = k * f(x) * (1 - f(k)) \quad (5.1)$$

Sendo,

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-k*(x-x_0)}} \quad (5.2)$$

Foi empregada a função logística para representar a função de taxa de plantio de árvores de café, *TPA*, em relação ao preço pago aos produtores, *PPP*, conforme a equação (5.3). Como dito, os preços pagos aos produtores foram calculados mediante regressão linear simples a partir dos preços (*ICO Composite Price*).

$$TPA(PPP(t)) = MAX \left(0, \frac{a_1}{1 + e^{-k_1(PPP(t-T_1)-ppp_{ref_1})}} - b_1 \right) \quad (5.3)$$

A Figura 5.1 apresenta a função “S” com diferentes valores de parâmetros para exemplificação. Os preços foram normalizados com o valor médio dos preços pagos aos produtores, ppp_{med} . O parâmetro a_1 , que representa o ponto de saturação superior da função, pode ser estimado de acordo com os valores históricos dos estoques em formação, sendo que o máximo encontrado é de 1,4 bilhões de árvores aproximadamente nos últimos 50 anos. O preço de referência, ppp_{ref_1} , indica o ponto de inflexão da função, onde temos o valor médio das ordenadas, onde ocorre a separação entre as influências dos preços acima da referência e as dos preços abaixo da referência. O parâmetro b_2 representa o ponto de saturação inferior. O parâmetro k_1 ($k_1 > 0$) representa a declividade da função em torno do ponto de inflexão, definindo uma faixa de sensibilidade aos preços entre os pontos de saturação.

O atraso T_1 representa o atraso entre o produtor tomar a decisão de plantar, após ter observado uma expectativa de aumento de preços, e a efetiva plantação de novas lavouras. Tal parâmetro não pode ser estimado diretamente por haver a consideração de muitos fatores para a tomada de decisão dos produtores. Osorio [35] registra a dificuldade encontrada para definir funções de investimento no mercado do café. Entretanto, este parâmetro é um atraso de tempo pequeno quando comparado com os demais atrasos do sistema, como o tempo de

maturação das plantas. Neste trabalho, para todos os efeitos, foi considerado um atraso T_1 de 1 mês.

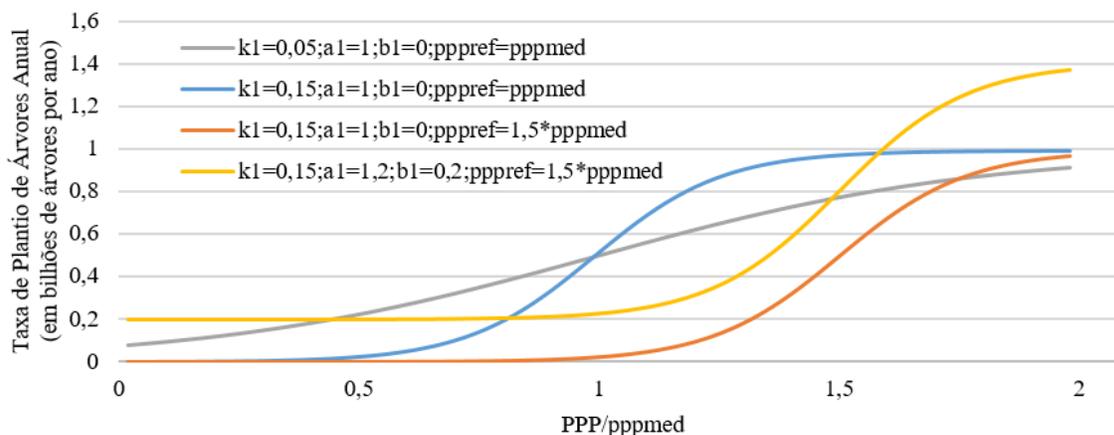


Figura 5.1 – Gráfico comparativo de taxas de plantio de árvores de café para diferentes valores de parâmetros da função logística. Fonte: Autor (2016).

Observando a Figura 5.1, podemos traçar o comportamento desejado das taxas de plantio de acordo com as médias dos preços ou outros valores de referência, penalizando o plantio para preços baixos e beneficiando para preços altos. A Figura 5.2 mostra o *boxplot* dos preços pagos aos produtores entre 1965 e 2015 para servir de base para definição da faixa de sensibilidade da função logística adotada.

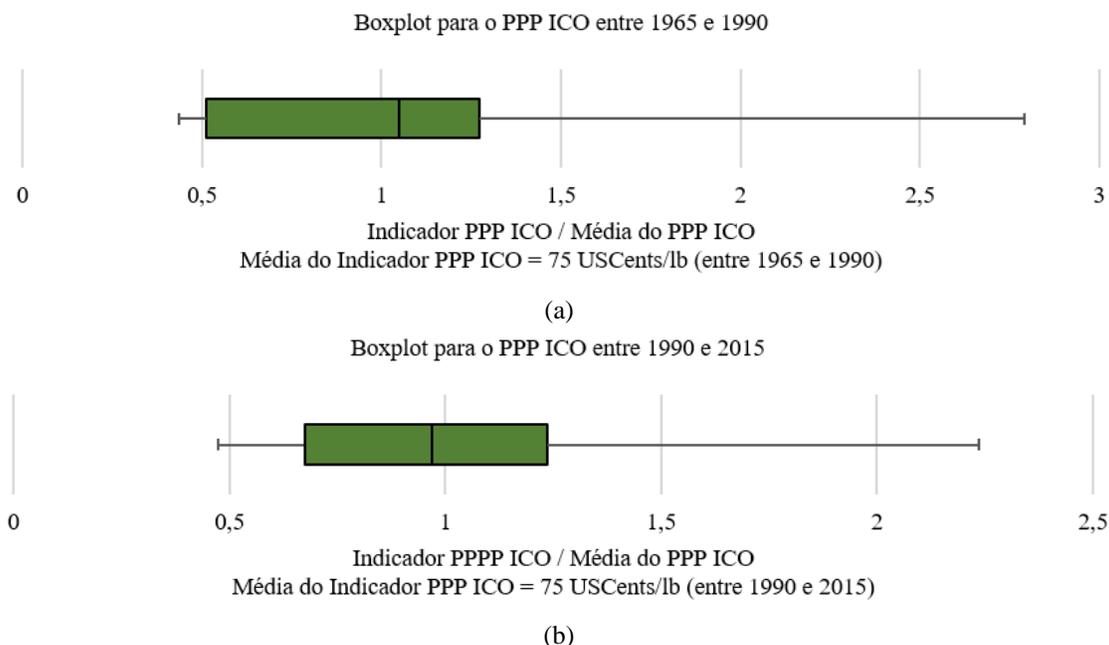


Figura 5.2 – *Boxplot* para os preços pagos aos produtores entre (a) 1965 e 1989, e entre (b) 1990 e 2015.

5.1.2 Estoque de árvores em fase de crescimento

A equação (5.4) descreve o estoque de árvores em fase de crescimento. A variação do estoque de árvores em crescimento, EAC , é o saldo entre as taxas de árvores plantadas, TPA , e de árvores replantadas, devido, principalmente, à prejuízos causados por alterações climáticas, $TARAC$, com o desconto da taxa de árvores que maturam, TAM .

$$\frac{dEAC}{dt} = TPA(PPP) + TARAC(t) - TAM(t) \quad (5.4)$$

A equação (5.5) descreve a taxa de árvores maturadas que é função da taxa de plantio de árvores considerado o tempo de atraso de maturação, T_2 . Entre os principais fatores que podem afetar a maturação, estão os efeitos das alterações climáticas, $EFACE$, e os efeitos dos cuidados aplicados às lavouras, $EFCAL$. As alterações climáticas consideradas para esta taxa são de efeito mais brando, quando não acarreta em grandes prejuízos como destruição de árvores. Entretanto, são alterações capazes de alterar os tempos de maturação e os estoques. Os efeitos dos cuidados aplicados às lavouras também são capazes de alterar atrasos e taxas de maturação, mas a sensibilidade dos estoques é baixa a esta variável. Tais fatores são complexos para serem estimados e podem ter sua ação limitada na taxa de maturação.

$$TAM(t) = MAX(0, h(TPA(t - T_2), EFCAL(PPP), EFACE)) \quad (5.5)$$

Portanto, neste trabalho, estas variáveis foram omitidas da estimação da taxa de árvores maturadas. As considerações feitas para estas duas variáveis, $EFACE$ e $EFCAL$, são aplicadas a todas demais taxas que alteram os estoques de árvores e também não serão consideradas nas respectivas equações. Por fim, a taxa de árvores maturadas é representada pela equação (5.6). O período de atraso T_2 aplicado é de 4 anos ou 48 meses [27].

$$TAM(t) = MAX(0, TPA(t - T_2)) \quad (5.6)$$

Entretanto, para melhor implementar a taxa de árvores maturadas, devido a muitos fatores que levam as plantas a ter uma maturação entre 3 e 5 anos [32], inclusive para cobrir as alterações climáticas e efeitos de cuidados dos produtores, foi empregado a função $delay3$ do software *iThink/Stella*. Tal função é capaz de gerar um comportamento de atraso de 3º ordem da entrada da função (cascata de atrasadores de 3º ordem). Este recurso também será

empregado em todas as taxas envolvidas no cálculo de estoques de árvores. Maiores detalhes da função *Delay3* podem ser vistos no apêndice [A.1](#).

A taxa de árvores replantadas devido alterações climáticas, *TARAC*, é uma variável exógena, que descreve um distúrbio do sistema. Trata-se de uma alteração climática severa, que elimina um número considerado de árvores produtivas, e que os produtores se planejam para a recomposição de suas lavouras. Esta taxa de replantio também apresenta um tempo de atraso em relação à época das destruições e precisa ser analisada caso a caso. No entanto, o atraso para a recomposição às árvores produtivas é de até 4 anos, como para as demais árvores plantadas.

5.1.3 Estoque de árvores com produtividade crescente

A equação [\(5.7\)](#) descreve os estoques de árvores com produtividade crescente, *EAPC*. A variação deste estoque é o saldo entre a taxa de entrada de árvores que maturaram, *TAM*, e a taxa de saída das árvores que possuem produtividade em declínio, *TAPD*, além da taxa de saída de árvores devido à alterações climáticas severas, *TAPAC₁*.

$$\frac{dEAPC}{dt} = TAM(t) - TAPD(t) - TAPAC_1(t) \quad (5.7)$$

A equação [\(5.8\)](#) descreve a taxa de árvores com produtividade em declínio, que é função da taxa de árvores maturadas considerado o tempo de atraso para entrar em fase de produtividade em declínio, *T₃*. O período de atraso *T₃* aplicado é de 10 anos ou 120 meses [\[27\]](#).

$$TAPD(t) = MAX(0, TAM(t - T_3)) \quad (5.8)$$

A taxa de árvores perdidas devido alterações climáticas, *TAPAC₁*, assim como para a variável *TARAC*, é um distúrbio exógeno do sistema. Trata-se da taxa de destruição de árvores devido às alterações climáticas severas como geadas, temporais com granizo e secas extremamente severas. Este distúrbio deve ser analisado caso a caso.

5.1.4 Estoque de árvores com produtividade em declínio

A equação (5.9) descreve os estoques de árvores com produtividade em declínio, $EAPD$. A variação deste estoque é dada pela soma entre a taxa de árvores com produtividade em declínio, $TAPD$, e a taxa de árvores em regeneração, TAR , e pelo desconto da taxa de árvores não-produtivas, $TANP$, e da taxa de árvores perdidas devido a alterações climáticas severas, $TAPAC_2$.

$$\frac{dEAPD}{dt} = TAPD(t) + TAR(t) - TANP(t) - TAPAC_2(t) \quad (5.9)$$

A equação (5.10) descreve a taxa de árvores que entram em fase não-produtiva, que é função da taxa de árvores com produtividade em declínio considerado o tempo de atraso para entrar em fase não-produtiva, T_4 . O período de atraso T_4 aplicado é de 26 anos ou 312 meses [27].

$$TANP(t) = MAX(0, TAPD(t - T_4)) \quad (5.10)$$

A equação (5.11) descreve a taxa de árvores regeneradas. A taxa de árvores regeneradas é igual a taxa de recuperação de árvores, $TRANP$, que é feita pelos produtores que buscam revitalizar suas lavouras consideradas improdutivas. As árvores em estágio de recuperação, que passaram por podas, especialmente o “esqueletamento”, possuem um tempo de atraso variado podendo ser de até 5 anos para voltar a produzir. Este atraso é representado pelo parâmetro T_5 . As considerações pertinentes a taxa de recuperação de árvores não-produtivas é feita na próxima seção 5.1.5.

$$TAR(t) = MAX(0, TRANP(t - T_5)) \quad (5.11)$$

A taxa de árvores perdidas devido às alterações climáticas, $TAPAC_2$, segue as mesmas considerações feitas para $TAPAC_1$. É importante fazer a separação entre as duas ações do clima, nos dois diferentes estoques, porque plantas mais jovens possuem capacidade de recuperação diferentes de plantas mais velhas, além de poder haver ações diferenciadas de cuidados aplicados pelos produtores.

5.1.5 Estoque de árvores em processo de regeneração

A equação (5.12) descreve os estoques de árvores em processo de regeneração. Este estoque é descrito como sendo o saldo entre a taxa de recuperação de árvores consideradas não-produtivas, $TRANP$, somando-se a taxa de árvores recuperadas devido às alterações climáticas severas, $TRAAC$, e descontando-se a taxa de árvores que se regeneraram, TAR .

A taxa de árvores recuperadas devido às alterações climáticas, assim como a taxa de replantio descrita anteriormente, $TARAC$, é uma variável exógena, que descreve um distúrbio do sistema. Esta taxa de recuperação, que visa a aplicação das mesmas técnicas agrícolas aplicadas as árvores não-produtivas, podas e “esqueletamento”, também apresenta um tempo de atraso em relação a época das destruições e precisa ser analisada caso a caso. No entanto, os atrasos para a recomposição às árvores produtivas (com produtividade em declínio) é de 1 a 5 anos.

$$\frac{dEAR}{dt} = TRANP(t, PPP) + TRAAC(t) - TAR(t) \quad (5.12)$$

A equação (5.13) descreve a taxa de árvores recuperadas, $TRANP$. Esta taxa é função da atratividade dos preços pagos aos produtores assim como para o plantio de novas árvores, ([27] e [28]). A função logística simplificada foi empregada para ponderar um fator que varia de 0 a 1, que representa a porcentagem desejada das lavouras improdutivas que serão recuperadas. O fator calculado pelo função “S” utilizada deve ser multiplicado pelo total de árvores improdutivas e, dependendo da faixa de preços aplicada e do parâmetro k_2 ($k_2 > 0$), pode-se ter um cenário onde todas ou nenhuma das árvores consideradas improdutivas são recuperadas.

$$TRANP(t, PPP) = MAX(0, EANP(t) * l(PPP)) \quad (5.13)$$

Sendo,

$$l(PPP) = \frac{1}{1 + e^{-k_2(PPP - ppv_{ref_2})}} \quad (5.14)$$

5.1.6 Estoque de árvores não-produtivas

A equação (5.15) descreve os estoques de árvores não-produtivas, $EANP$. Este estoque possui, como taxa de entrada, a taxa de árvores consideradas não-produtivas, $TANP$, e possui,

como saída, a taxa de árvores recuperadas, $TRANP$, e a taxa de árvores que são descartadas, $TDANP$. Entre as principais motivações para o descarte de árvores, estão os preços baixos pagos, mas, como em muitos casos, existe também a atratividade de outras culturas como soja, feijão, milho, batata e o açúcar em algumas regiões [28]. Neste trabalho, foi considerado apenas a influência dos preços no descarte de árvores.

$$\frac{dEANP}{dt} = TANP(t) - TRANP(t, PPP) - TDANP(t, PPP) \quad (5.15)$$

A equação (5.16) descreve a taxa de descarte de árvores não-produtivas, $TDANP$. Esta taxa tem a ação contrária à de recuperação das árvores sendo, portanto, descrita pelo complemento do fator de recuperação descrito na seção anterior 5.1.5.

$$TDANP(t, PPP) = MAX(0, EANP(t) * o(PPP)) \quad (5.16)$$

Onde,

$$o(PPP) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_2(PPP - ppp_{ref_2})}} = 1 - l(PPP) . \quad (5.17)$$

5.1.7 Modelo matemático completo dos estoques de árvores

O diagrama da Figura 5.3 descreve a modelagem matemática computacional do modelo completo dos estoques de árvores de café, conforme equações descritas anteriormente, e que foi implementado no *software iThink/Stella* para simulação numérica [26].

O estoque de árvores em formação EAF é formado pela soma dos estoques de árvores em crescimento e pelas árvores em regeneração, sendo descrito pela equação (5.18). Os estoques de árvores em produção EAP são formados por estoques de árvores com produtividade crescente e pelas árvores com produtividade em declínio, sendo descrito pela equação (5.19). As árvores em formação e as consideradas não-produtivas, apesar da nomenclatura adotada, possuem alguma produtividade, ainda que baixa.

$$EAF(t) = EAC(t) + EAR(t) \quad (5.18)$$

$$EAP(t) = EAPC(t) + EAPD(t) \quad (5.19)$$

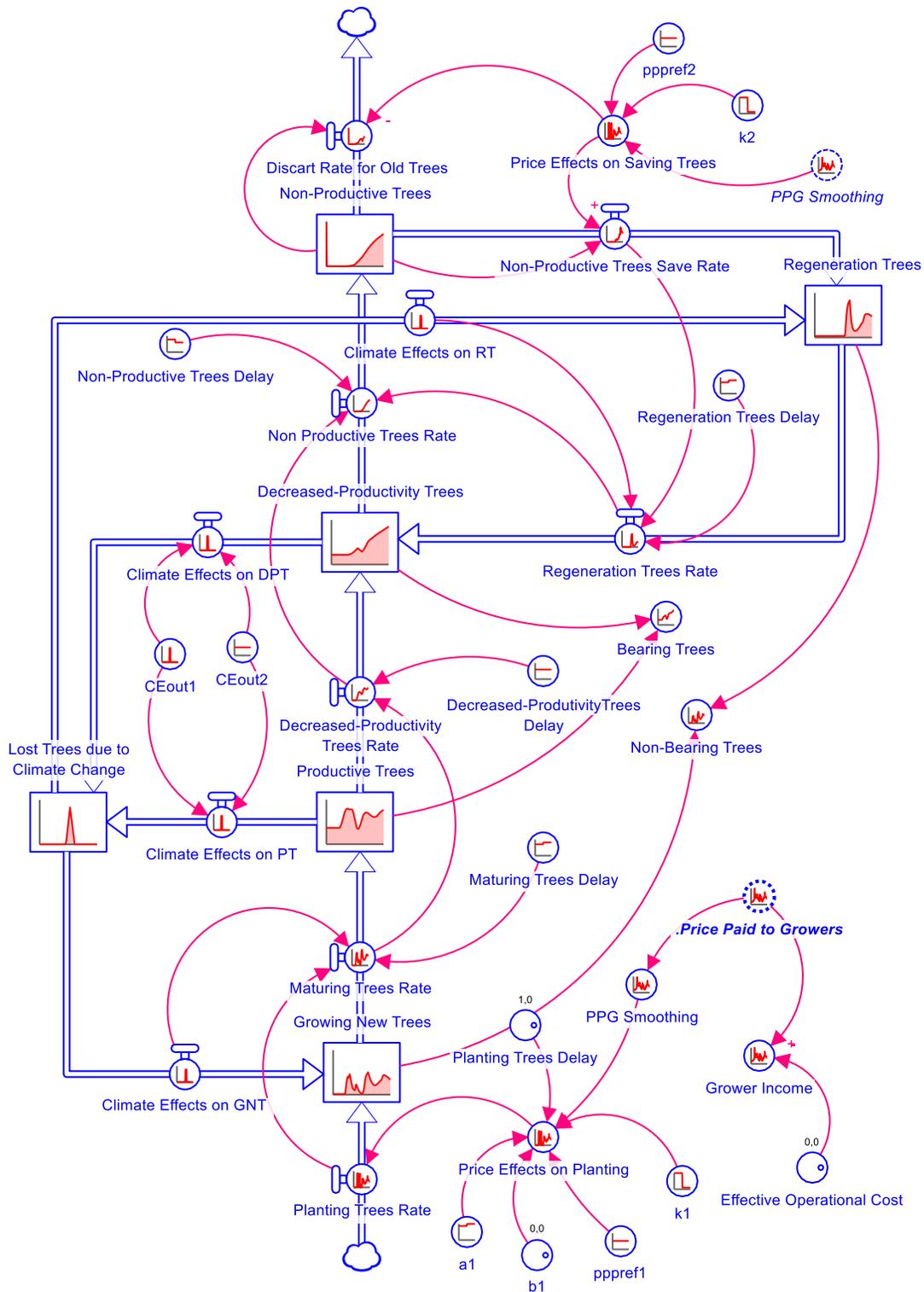


Figura 5.3 – Modelo matemático computacional completo para os estoques de árvores de café elaborado em *iThink/Stella*.

Nota: - *CEout1(Climate Effects)*: alterações climáticas entre 1990 e 1994.
 - *CEout2(Climate Effects)*: alterações climáticas entre 2013 e 2015.

5.1.8 Produtividade das árvores de café

Após as definições dos principais estoques de árvores de café, conforme foi descrito nas seções anteriores, e tomado a evolução da produtividade média das árvores de acordo com a idade das plantas, conforme a Figura 2.5, é adotado e calculado a produtividade média para cada tipo de estoque de árvores.

Foram considerados dois estoques de árvores: estoque de árvores com produtividade crescente, cuja produtividade média é de 0,010880 sacas por árvore por ano, representada pela variável *PMAPC*, e estoques de árvores com produtividade em declínio, cuja produtividade média é de 0,008929 sacas por árvore por ano, representada pela variável *PMAPD*. Estes dois grupos de estoques correspondem a mais de 90% da capacidade de produção de café.

Embora sejam consideradas as produtividades médias das árvores, devem ser considerados os principais fatores capazes de alterar estas produtividades. São dois os fatores mais significativos: os efeitos das alterações climáticas nas produtividades, *EFACP*, e os efeitos de cuidados aplicados às lavouras pelos agricultores na produtividade, *EFALP*. Como visto, as alterações climáticas provocam vários distúrbios e, com base nos dados históricos e vegetativos das plantas, as alterações mais significativas, quando ocorrem, causam baixas ou altas nas produtividades. Já os cuidados aplicados sempre beneficiam as produtividades, mas a falta de cuidados pode ser considerada como um agente de redução da produtividade em relação à média e podem ser associados aos baixos ou altos preços pagos aos produtores.

Os efeitos das alterações climáticas, *EFACP*, precisam ser analisados caso a caso, mas, para este trabalho, foi definido como sendo um valor percentual constante de quebra ou de aumento de produtividade. Inclusive, foi adotado a mesma metodologia para a bianualidade da cultura, como veremos na próxima seção 5.1.9.

Como descrito por Laignelet [27], a produtividade das árvores com os devidos cuidados pode chegar ao dobro da produtividade sem os cuidados devidos do produtor. Este dado implica em uma variação de 33% em torno das médias de produtividade das árvores. A função logística foi empregada novamente para ponderar um fator que varia de -0,33 a 0,33 ($a_2 = 0,66$ e $b_2 = 0,33$), que representa a porcentagem de efeitos dos preços sobre a

produtividade média ou dos efeitos dos cuidados dos produtores. O fator calculado pela função “S” utilizada deve ser multiplicado pela produtividade média e, dependendo da faixa de preços aplicada e do parâmetro k_3 ($k_3 > 0$), pode-se ter vários cenários de produtividade. A equação (5.20) mostra a função adotada para o *EFCALP*.

$$EFCALP(PPP) = MAX \left(0, \frac{0,66}{1 + e^{-k_3(PPP - PPP_{ref_3})}} - 0,33 \right) \quad (5.20)$$

A equação (5.21) mostra a função adotada para a produtividade das árvores com produtividade crescente, *PAPC*, e a equação (5.22) mostra a função adotada para a produtividade das árvores com produtividade em declínio, *PAPD*. O atraso T_6 é o atraso de tempo para ser ajustada a produtividade das árvores e varia de 1 a 4 anos, conforme estudo de correlação. Será utilizado a função *delay3* do *software iThink/Stella* para implementar os efeitos do atraso.

$$PAPC(t, PPP) = PMAPC * (1 + EFACP) * (1 + EFCALP(PPP(t - T_6))) \quad (5.21)$$

$$PAPD(t, PPP) = PMAPD * (1 + EFACP) * (1 + EFCALP(PPP(t - T_6))) \quad (5.22)$$

5.1.9 Capacidade total de produção

Uma vez calculadas as produtividades e os estoques de árvores, calculamos a capacidade de produção multiplicando as duas variáveis. Então, a equação (5.23) descreve a capacidade do estoque *EAPC* e a equação (5.24) descreve a capacidade do estoque *EAPD*.

$$CPAPC(t, PPP) = EAPC(t) * PAPC(t, PPP) \quad (5.23)$$

$$CPAPD(t, PPP) = EAPD(t) * PAPD(t, PPP) \quad (5.24)$$

O café é uma cultura bianual, portanto, após um ano de safra expressiva, as lavouras sofrem um desgaste natural que causam uma perda na próxima safra. Quanto maior for a safra do ano presente, favorecido por todos os fatores já descritos, maior é a tendência de quebra na safra seguinte. Esta quebra, que é representada pelo fator $f_{bianual}$, é observada variar entre 10% e 30% da produção total na prática, mas podem ser encontradas quebras maiores. Usualmente é observado quebras de 20% [28]. Como dito anteriormente, este fator também sofre efeitos das alterações climáticas, sendo amenizado uma vez que as alterações

climáticas atuam no sentido de baixar a produtividade. A variável *EFACBI* representa este efeito quando ocorrem as alterações climáticas.

Finalmente, as equações (5.25) e (5.26) descrevem a capacidade de produção total de café verde, *CPT*.

$$CPT(t, PPP) = (1 - SW * EFACBI * f_{biannual}) * (CPAPC(t, PPP) + CPAPD(t, PPP)) \quad (5.25)$$

Sendo,

$$SW = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq 12, \text{ t em meses;} \\ 0, & 12 < t \leq 24; \end{cases} \text{ e } SW(t + 24) = SW(t) \quad (5.26)$$

A Figura 5.4 mostra o modelo matemático computacional completo para a capacidade da produtividade de café, conforme as equações anteriores, e que foi implementado no software *iThink/Stella*. O modelo completo da capacidade de produção é formado pelas modelos computacionais da Figura 5.3 e Figura 5.4.

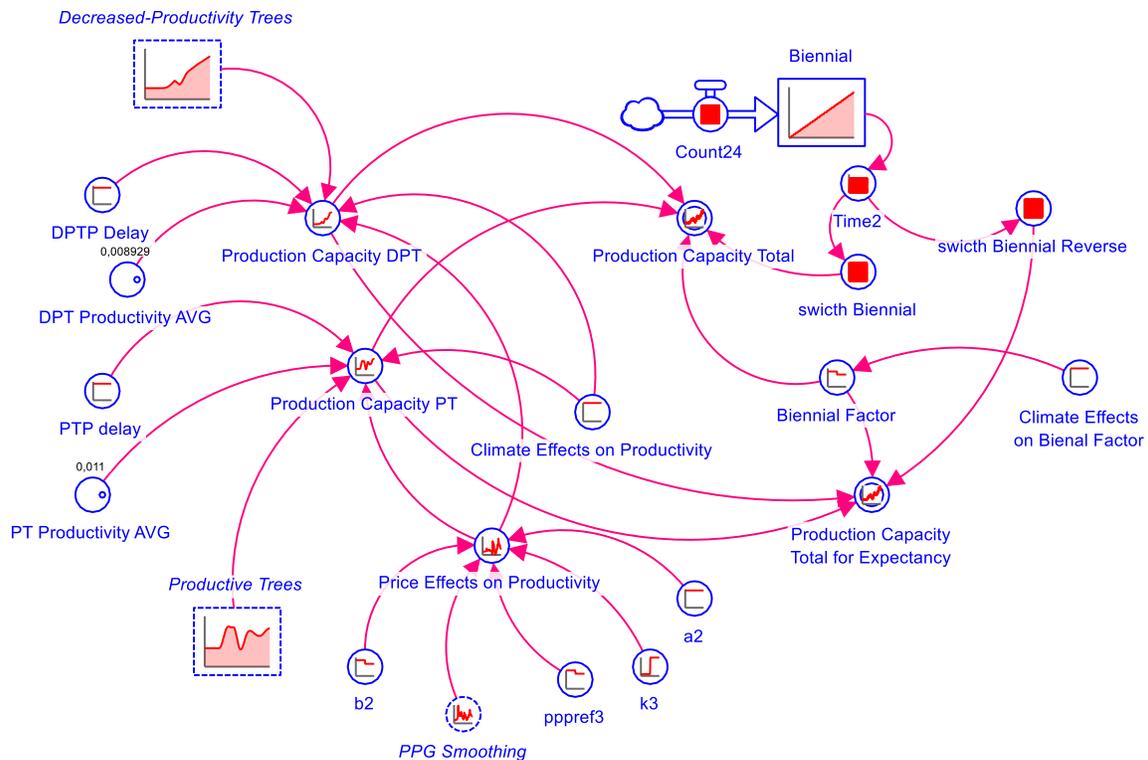


Figura 5.4 – Modelo matemático computacional completo para as produtividades das árvores de café implementado em *iThink/Stella*.

5.2 Produção e estoques brutos de café verde

Neste trabalho, baseado nos dados da seção 2.3.1, dentro do contexto da produção de café, foi adotado a função matemática da densidade de probabilidade da distribuição normal

para representar a taxa de colheita de café esperada, $TCOL$, ao longo do ano safra, conforme as equações (5.27) e (5.28) abaixo.

$$TCOL(t, CPTe) = CPTe(n, PPP) * \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{col}^2}} e^{-\left(\frac{(t-n*12)-\mu_{tcol}}{2\sigma_{col}^2}\right)^2} \right), \quad \begin{cases} n = 0,1, \dots \text{anos} \\ t > 0 \\ \sigma_{col} > 0 \end{cases} \quad (5.27)$$

Sendo,

$$CPTe(t, n, PPP) = CPT(t, PPP) * \delta((t - n * 12) - 3) \quad (5.28)$$

Para analisar o horizonte de mais de um ano, é necessário tornar a função adotada em uma função periódica com período de 12 meses. O parâmetro n representa a contagem do tempo em anos. A média de tempo da distribuição das taxas de colheita durante o ano, μ_{tcol} , é de 6,45 meses, ou seja, o pico de produção ocorre entre os meses de junho e julho. O desvio padrão, σ_{col} , do tempo da curva de distribuição é de 1,24 meses. A variável $CPTe$ representa a capacidade de produção total anual efetiva e está descrita na equação (5.28). Esta variável, $CPTe$, descreve a capacidade total de produção no mês de início da colheita (março) quando não é mais possível alterar a capacidade, que será 100% colhida durante a safra. Para todos os efeitos práticos, a nova capacidade começa a ser formada a partir de setembro, partindo do fim da colheita, quando se dá a primeira florada do café. Assim, a função densidade de probabilidade da equação (5.27) defini as porcentagens mensais colhidas do total da capacidade anual.

Conforme proposto por Sterman [42], é gerado o modelo de trabalho em progresso para o beneficiamento do café, onde a equação (5.29) descreve a quantidade de café que está em beneficiamento pelos produtores. O trabalho em progresso ou beneficiamento, BEN , é definido como o saldo entre a taxa de colheita e a taxa de recebimento de café pelos estoques, $TRECE$.

$$\frac{dBEN}{dt} = TCOL(t, CPTe) - TRECE(t) \quad (5.29)$$

A equação (5.30) descreve a taxa de recebimento de sacas de café verde pelos mecanismos de estocagem, que foi idealizado a partir dos recebimentos das cooperativas descrito na seção 2.4.1. O parâmetro T_7 representa o tempo de atraso de 2 meses correspondente a fase de beneficiamento.

$$TRECE(t) = MAX(0, TCOL(t - T_7)) \quad (5.30)$$

A modelagem do comportamento dos estoques é um grande desafio [32]. Conforme os estudos realizados e as informações da seção 2.10, a equação (5.31) descreve a evolução dos estoques brutos de café verde, EB , nos principais meios de estocagem (estoques públicos e privados). Esta equação é definida como sendo a diferença entre a taxa de recebimento e as taxas de aquisição de café dos torrefadores, $TATOR$, e de aquisição dos exportadores, $TAEXP$.

$$\frac{dEB}{dt} = TRECE(TCOL) - TATOR(COD, ETO) - TAEXP(DEXP, EEXP) \quad (5.31)$$

A $TATOR$ é função do consumo doméstico brasileiro, COD , e dos níveis de estoques das torrefadoras, ETO . A $TAEXP$ é função das taxas de demandas de exportação, $TDEXP$, e dos níveis dos estoques dos exportadores, $EEXP$. As variáveis que correspondem às demandas ou aquisições, como as aquisições das torrefadoras e dos exportadores, serão tratados na próxima seção 5.3.

A Figura 5.5 mostra o modelo computacional elaborado para a análise das equações descritas para a produção (colheita e pós-colheita) e para a formação dos estoques brutos, além das demandas totais de café brasileiro.

5.3 Consumos e exportações

Podemos dividir os agentes de demandas por café em dois grupos: as torrefadoras, que são puxadas pelo consumo doméstico brasileiro, e os exportadores, que são puxados pelo consumo internacional [32]. As quantidades demandas para os dois grupos devem ser determinados pelos consumos e pelos níveis desejados de estoques de cobertura. Neste contexto, deve existir uma especial atenção aos exportadores, pois as regras de estocagem de cobertura e demandas de consumo aos estoques brutos devem ser diferenciadas das estratégias das torrefadoras. Se assumirmos os avanços nos transportes, globalização e possível aplicação do SMI pelas torrefadoras, é esperado que os estoques de cobertura diminuam ao longo dos anos, apesar do aumento dos consumos.

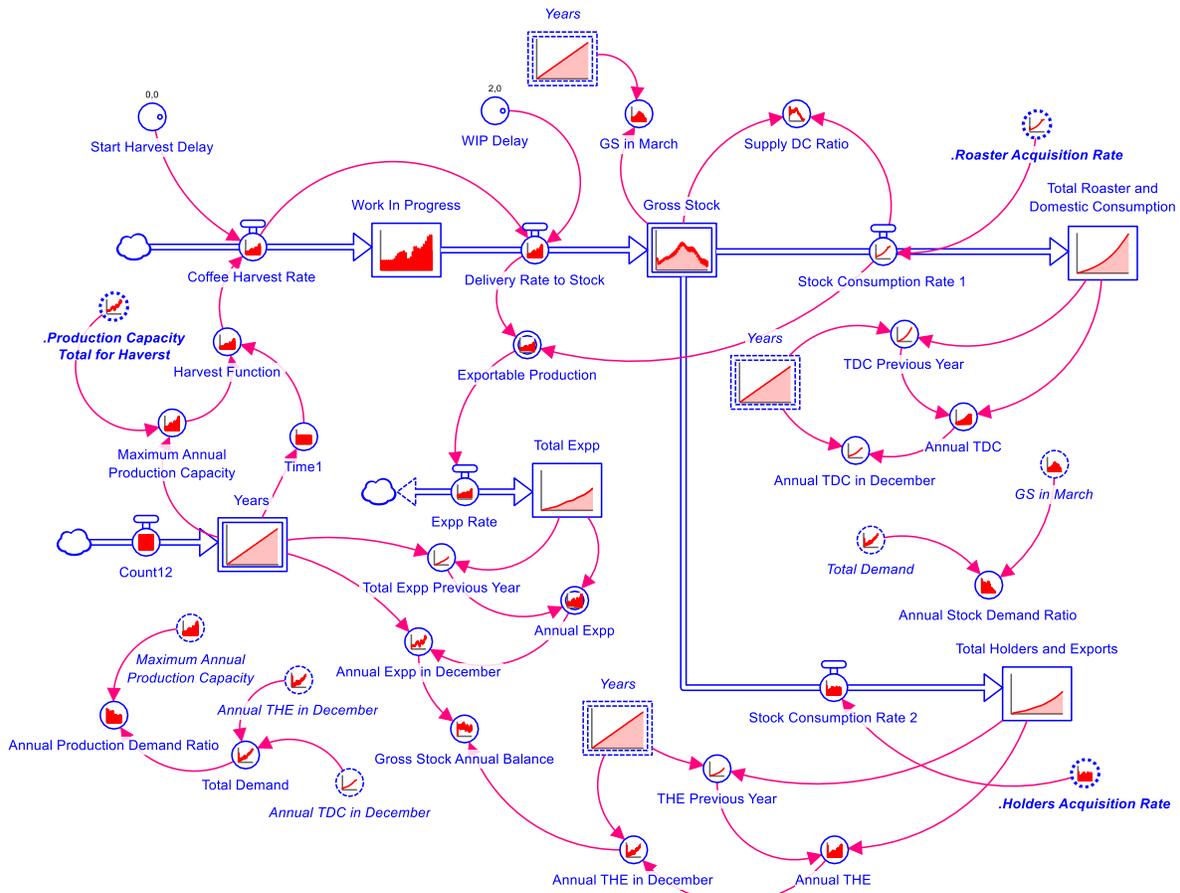


Figura 5.5 - Modelo matemático computacional completo para a produção e estocagem bruta de café elaborado em *iThink/Stella*.

5.3.1 Torrefadoras e consumo doméstico

Como vimos, o consumo doméstico, *DOC*, esteve em crescimento constante desde 1960 pelo menos. A princípio, não existe uma relação entre o mercado do *commodity* e o consumo doméstico [23]. A sensibilidade do consumo doméstico está relacionada com a economia em geral e a inflação dos alimentos, sofrendo influência do mercado do varejo [44]. Para esta variável exógena, em termos de simulação numérica, será adotado curvas crescentes ou decrescentes em função do tempo (relação linear ou exponencial), pois o consumo tende a ter uma dinâmica muito lenta.

As equações (5.32) a (5.35) descrevem a dinâmica proposta para a gerencia dos estoques das torrefadoras. A variação dos estoques é dado pela diferença entre *TATOR* e *DOC*. O nível de estoques de cobertura das torrefadoras, *netoc*, é função do consumo, mas poderiam ser em função do consumo estimado, *CODEST*. Entretanto, dado os comentários

tratados sobre os estoques de cobertura na seção 2.10, será assumido que seus níveis diminuam gradativamente e de forma linear ao longo dos anos. Os estoques desejados, $ETOD$, refletem o tempo de cobertura desejado para manter o consumo ou estimativa de consumo. A taxa de aquisição desejada das torrefadoras, $TATORD$, é pensada para cobrir o consumo estimado (que pode ser a própria taxa de consumo) e corrigir os desvios dos estoques que possuem um tempo de ajuste, $taetor$.

$$\frac{dETO}{dt} = TATOR(COD, ETO) - COD(t) \quad (5.32)$$

$$ETOD = netoc(t) * COD(t) \quad (5.33)$$

$$TATORD = CODEST + \frac{ETOD(t) - ETO(t)}{taetor} \quad (5.34)$$

$$TATOR(COD, ETO) = MAX(0, TATORD) \quad (5.35)$$

A Figura 5.6 mostra o modelo computacional para o mercado das torrefadoras brasileiras.

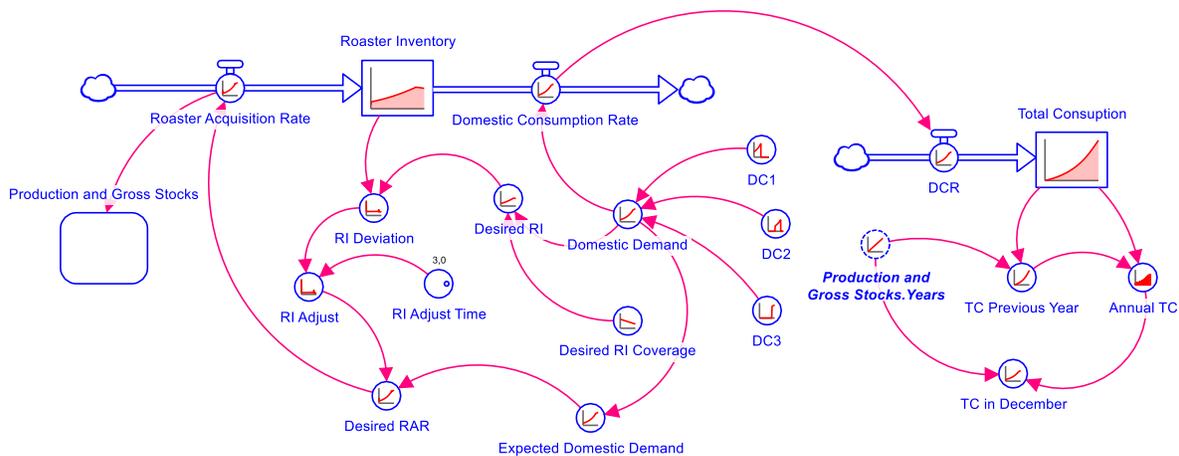


Figura 5.6 - Modelo matemático computacional para a demanda do consumo doméstico brasileiro de café elaborado em *iThink/Stella*.

5.3.2 Exportadores de café

A Figura 5.7 mostra o modelo computacional para o mercado das exportações brasileiras. Este modelo dinâmico é bastante parecido com o modelo descrito para o consumo doméstico, exceto pelas definições das taxas de demandas e pelos níveis de estoques de cobertura desejados.

As equações (5.36) a (5.39) descrevem a dinâmica proposta para a gerencia dos estoques dos exportadores. A variação dos estoques é dado pela diferença entre $TAEXP$ e $TDEXP$. O nível de estoques de cobertura dos exportadores, $neexp$, é função das estimações dos preços, $PFISEST$, e da taxa de exportação, mas poderiam ser em função da exportação estimada, $DEXPEST$. A taxa de aquisição desejada dos exportadores, $TAEXPD$, é pensada para cobrir a exportação estimada (que pode ser a própria taxa de exportação) e corrigir os desvios do estoques, que possuem um tempo de ajuste, $taexp$.

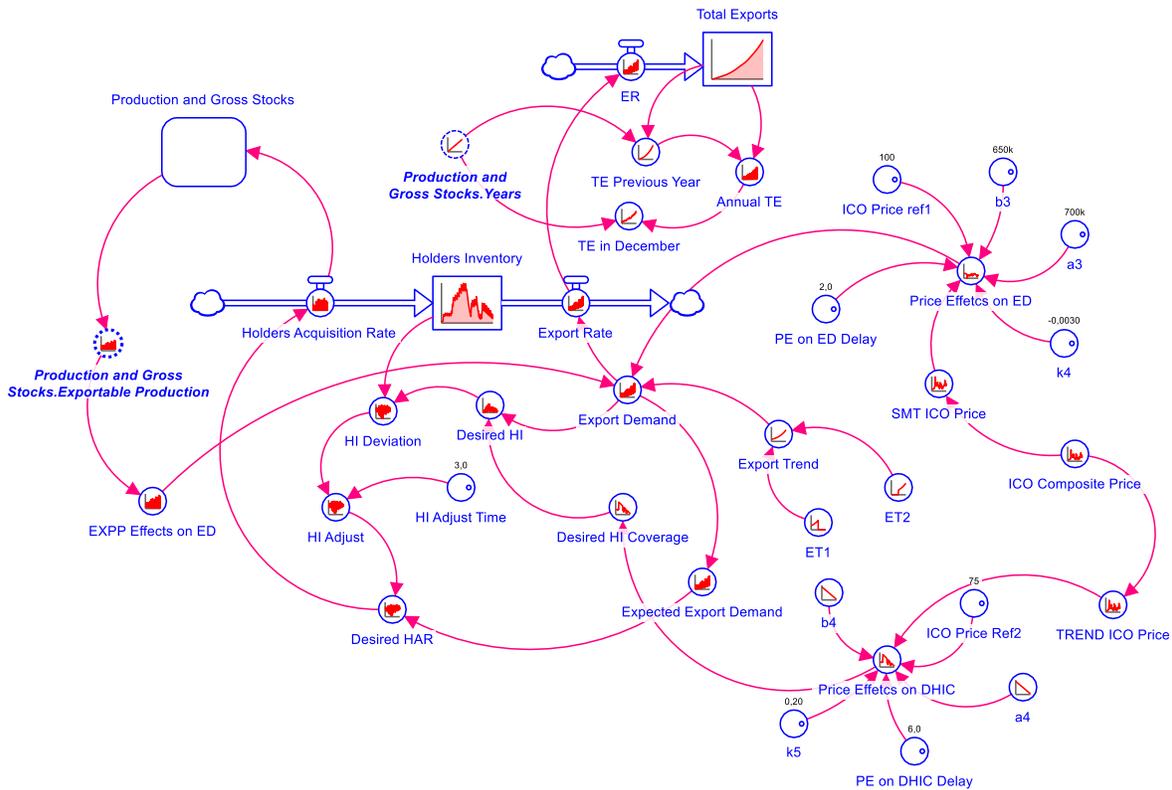


Figura 5.7 - Modelo matemático computacional para a demanda de exportação de café elaborado em *iThink/Stella*.

$$\frac{dEEXP}{dt} = TAEXP(TDEXP, EEXP) - TDEXP(t) \quad (5.36)$$

$$EEXPD = neexp(t, TDEXP, PFISEST) * TDEXP(t) \quad (5.37)$$

$$TAEXPD = DEXPEST + \frac{EEXPD(t) - EEXP(t)}{taexp} \quad (5.38)$$

$$TAEXP(TDEXP, EEXP) = MAX(0, TAEXPD) \quad (5.39)$$

A taxa de demanda de exportação, $TDEXP$, é função das seguintes variáveis: tendência de taxa de demanda de café internacional, $TTDINT$, preços do café, $PFIS$, e da taxa de produção exportável, $TPEXP$. A função $TDEXP$ pode ser observada na equação (5.40).

A taxa de demanda $TTDINT$ é fundamentada a partir das taxas de consumo nos países importadores e consumidores, além das taxas de reexportação que apontam o crescimento dos consumos em geral, como visto até aqui. Sua estimação é calculada como sendo a tendência exponencial de exportação de cafés do Brasil. A equação (5.41) descreve a taxa $TTDINT$, onde $EXPIN$ é a taxa inicial e τ_{cexp} é a constante de tempo de crescimento.

Para representar a influências dos preços nas demandas de exportação, foi adotado a função logística já conhecida, sendo que a função será calibrada para representar o cenário descrito na seção 2.5. Para isto, o sinal do parâmetro k_4 ($k_4 > 0$) foi alterado para ser positivo na equação e podermos representar que mais exportação é impulsionada por preços mais baixos que a referência adotada. Neste caso, é esperado que haja um atraso de resposta T_8 em relação aos preços (trâmites legais, embarques, etc). A equação (5.42) representa a influência dos preços.

A taxa de produção exportável é uma variável que mede as quantidades de café que foram geradas como excedentes ou escassez durante o ano safra. Neste trabalho, a produção exportável é definida como a diferença entre a produção de café e a taxa de aquisição das torrefadoras. A produção pode ser definida como sendo as taxas de recebimento pelos estoques brutos. Os efeitos da taxa de produção exportável nas demandas de exportação são proporcionais ($efpexp$), além de haver um atraso esperado T_9 (os mercados dão sinais de atender primeiro o mercado nacional, medir excedentes e depois atender as exportações) [28]. As equações (5.43) e (5.44) representam a influência das taxas de produção exportável.

$$TDEXP(t) = TTDINT(t) + q(PFIS) + r(TPEXP) \quad (5.40)$$

Sendo,

$$TTDINT(t) = EXPIN * e^{\frac{1}{\tau_{cexp}} * t} \quad (5.41)$$

$$p(PFIS) = \frac{a_3}{1 + e^{k_4(PFIS(t-T_8) - p_{fis_{ref_1}})}} - b_3 \quad (5.42)$$

$$r(TPEXP) = efpexp * TPEXP(t - T_9) \quad (5.43)$$

$$TPEXP(t) = TRECE(t) - TATOR(t) \quad (5.44)$$

Quanto aos níveis de estoques de cobertura, *neexp*, como no caso das torrefadoras, não será considerado a influência da demanda por exportação para simplificação, mas sim a ação dos preços e da aplicação do SMI.

Quando os preços do café aumentam (diminuem), os exportadores aumentam (diminuem) seus estoques de cobertura. Os exportadores tendem a comprar mais café verde para aumentar seus estoques de cobertura em antecipação à expectativa de aumento de preços. Esta é uma estratégia de proteção contra mais aumento de preços. Entretanto, para estoques elevados tem-se custos de estocagem elevados e, mesmo com preços baixos, existe um estoque de cobertura mínimo necessário para manter o fluxo. Por isso, foi empregado a função logística para representar este comportamento, conforme a equação (5.45). Este conceito é bem conhecido pela teoria de suprimentos de estoques e é abordada por vários autores, inclusive Weymar (1968) para o mercado do cacao e Laignelet (1976) para o mercado do café [27].

Contudo, dado os comentários tratados sobre os estoques de cobertura na seção 2.10, com o possível uso do sistema SMI pelos exportadores, será assumido que os níveis de saturação da função logística diminuam gradativamente e de forma linear ao longo dos anos. O valor do parâmetro k_5 ($k_5 > 0$) foi mantido constante. Para este efeito nos estoques de cobertura, é esperado que exista um atraso de tempo T_{10} devido aos ajustes dos estoques e estratégias dos gestores.

$$neexp(PFISEST, t) = \frac{a_4(t)}{1 + e^{-k_5(PFISEST(t-T_{10})-pfi_{sref_2})}} - b_4(t) \quad (5.45)$$

Neste capítulo, vimos o modelo proposto quantitativo da dinâmica da cadeia de suprimentos do mercado do café. Foram propostas equações diferencial para os principais subsistemas da cadeia como a capacidade de produção (estoques de árvores), produção, estoques e demandas. Um aspecto importante é que os atrasos são representados como atrasos de material (definição dada por Sterman [42]) nas equações, mas foi utilizado a função *delay3()* do *iThink/Stella* para a simulação numérica. A função *delay3()* é uma cascata de atrasadores de 3º ordem que corresponde a uma simplificação dos atrasos de material. Desta

forma os atrasos de material são representados como atrasos de informação (definição dada por Sterman [42]). Este tipo de aplicação é muito comum em simulações de mercados de *commodities*. Por fim, foram identificados os principais parâmetros do modelo sendo 11 variáveis de estado, 10 variáveis exógenas, 29 variáveis auxiliares endógenas e 32 parâmetros ajustáveis.

Capítulo 6

Ajuste paramétrico do modelo quantitativo e simulações

As análises realizadas neste capítulo visam ajustar o modelo desenvolvido e investigar o comportamento da cadeia de produção e seus transitórios. O primeiro objetivo é ajustar o modelo de linha de suprimento para entender os mecanismos de produção, estoques e demandas. Para investigar o comportamento após ajustes, são propostas análises das influências das secas entre 2013 e 2015 e das estimativas de preços fundamentadas nos cenários de queda constante.

O período considerado para efeitos de ajuste de dados é de 55 anos, de 1960 a 2015. Os principais parâmetros, num contexto geral, foram ajustados diferenciando os períodos com e sem intervenções ICA. Mais ainda, os parâmetros foram ajustados ponderando também a grande influência dos efeitos climáticos entre 1991 e 1994. Por isso, muitos parâmetros apresentam valores ajustados distintos pré-1994 e pós-1994 (mês 335 na linha temporal de simulação, cujo código está no apêndice [C.2](#)).

Outra informação importante é que não há dados dos estoques de árvores para antes de 1965. Isso significa que para os primeiros 30-40 anos simulados, não estão disponíveis os dados dos níveis de estoques de árvores antigos, (por exemplo, estoques de árvores não-produtivas) que teriam sido plantadas antes de 1965. Veja que as árvores plantadas em 1965 terão 40 anos (idade considerada improdutiva) em 2005, quando chegariam aos estoques de árvores não-produtivas e estariam disponíveis para recuperação (esqueletamento).

6.1 Ajuste paramétrico do modelo com dados históricos (1965-2015)

Para efetuar o ajuste do modelo descrito no capítulo [5](#), foram definidas as variáveis exógenas com suas respectivas séries temporais ou valores estimados a partir dos dados históricos. Além disso, foi determinado ajustar as variáveis mais representativas do modelo

em ordem cronológica de efeitos (preços formam capacidade de produção, que formam produção, que formam estoques de café, que atendem as demandas, que formam preços novamente).

Semelhantemente a Pierson e Sterman [36], como o ajuste envolve um processo de otimização, os parâmetros do modelo foram estimados pela minimização da raiz da soma dos quadrados dos erros entre as saídas do modelo e as séries temporais, dividindo esta raiz pela média dos dados ($RMSE/\mu$). O modelo foi dividido em submodelos para a estimação parcial e de forma simultânea. Os submodelos são ajustados em sequência pela ordem cronológica. Alguns parâmetros tiveram sua faixa de atuação definida com o apoio do método *Generalized Reduced Gradient* (GRG) (Veja o apêndice A.1).

Sendo assim, foram ajustados os estoques de árvores em formação, os estoques de árvores produtivas, a taxa de produção, as taxas de exportação e os estoques brutos.

Para cada variável objeto de ajuste, foi empregado o seguinte procedimento: (i) definir valores iniciais dos parâmetros do modelo com base nos dados históricos; (ii) configurar o *solver* do *iThink/Stella* para efetuar múltiplas execuções, variando os parâmetros com valores predeterminados e fazendo uso dos *sliders* para variar parâmetros com facilidade (*Sensitivity Analysis and Partial Simulation*). Além disso, gerar gráficos comparativos para análise de respostas (análise de sensibilidade dos parâmetros e tentativa em gerar superfícies de resposta); (iii) exportação de dados do *iThink/Stella* para o *MS-Excel* para cálculo de erros, correlações e parâmetros de Thiel; (iv) Verificação se o erro $RMSE/\mu$ admissível é satisfeito, caso contrário retornar as análises com atualização dos parâmetros.

Como dito, a função de custo a ser minimizada é a soma dos quadrados dos erros dividido pela média dos dados. Entretanto, não foi possível estipular um critério de valor máximo de erro admissível muito baixo, sendo fixado um limite de 10%. Esta dificuldade é devido ao fato do *iThink/Stella* não dispor de ferramentas de otimização e da dificuldade em integrar o *software* com *softwares* de otimização, como o *Berkeley Madonna*. Além disso, o modelo possui muitos parâmetros.

Os resultados para os estoques de árvores produtivas podem ser observados na Figura 6.1. Os resultados dos erros e correlações estatísticas calculados estão na Tabela 6.1.

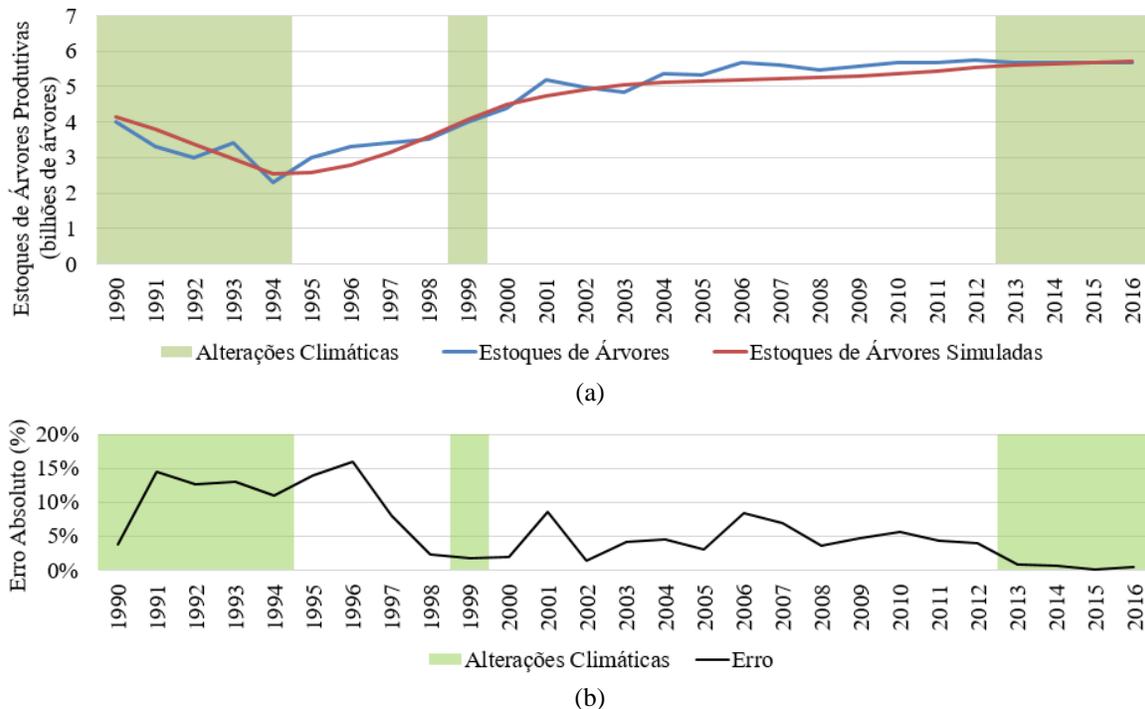
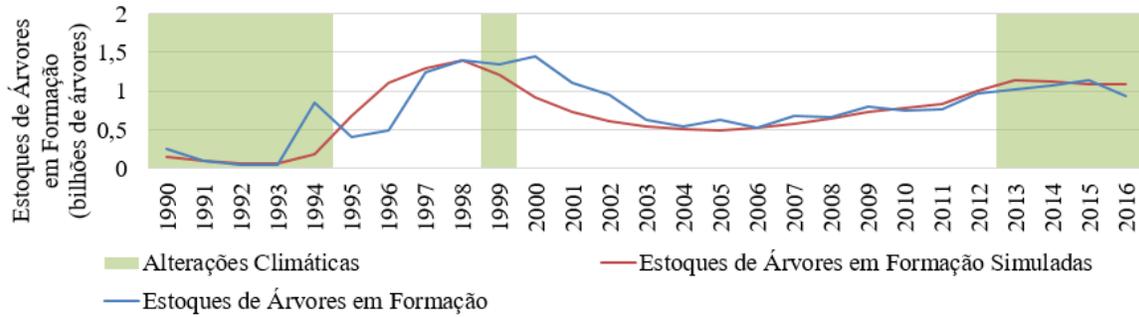


Figura 6.1 – Resultados de simulação de ajuste dos estoques de árvores produtivas (a) e erro absoluto (b).

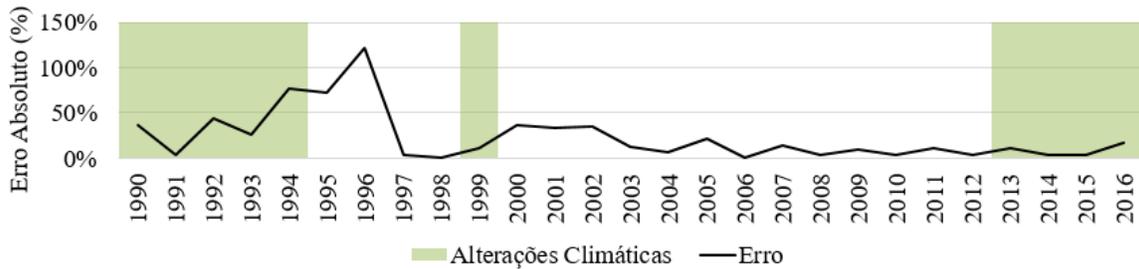
Como descrito, as lavouras plantadas em 1965 teriam 40 anos em 2005. Então as dinâmicas das plantações de 1965 começam a chegar nos estoques de árvores improdutivas em 2005. Apesar dos resultados até este ano, os ajustes pesaram as dinâmicas das lavouras novas. A partir de 2005 começa a surgir as dinâmicas das lavouras antigas e a recuperação delas. Este contexto explica o erro absoluto maior por volta de 1993, além, evidentemente, da ação das alterações climáticas. Os preços de referência ficaram em torno de 105 UScents/lb no período todo, mas as declividades da função logística apresentam sensibilidade variando entre 0,2 antes 1994 e 0,02 após 1994.

As representações das duas grandes alterações climáticas no período foram bem descritas no modelo (1990 a 1994 e 2013 a 2016), apesar do maior erro absoluto em torno de 1993. Não existem estatísticas das perdas devido à seca entre 2013 e 2016 e, por isso, foram estimadas as árvores perdidas pelo desconto entre o resultado das simulações e os dados. Portanto, observa-se erro baixo neste período de 2013 e 2016.

Os resultados para os estoques de árvores em formação podem ser observados na Figura 6.2. Os resultados dos erros e correlações estatísticas calculados estão na Tabela 6.1.



(a)

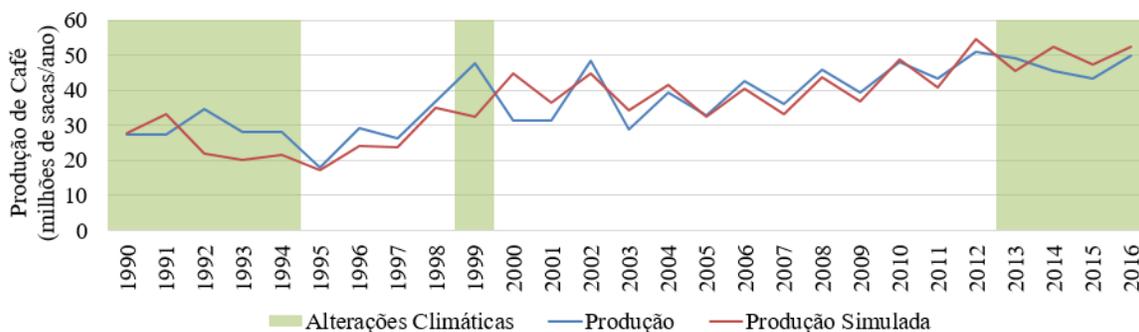


(b)

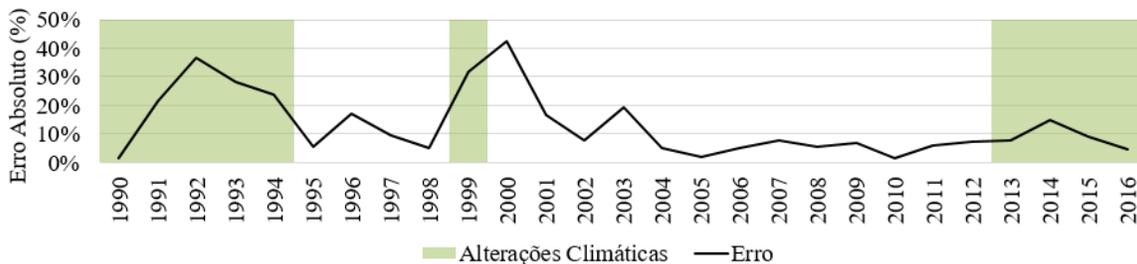
Figura 6.2 – Resultados de simulação de ajuste dos estoques de árvores em formação (a) e erro absoluto (b).

As mesmas explicações dadas para as idades das árvores produtivas valem para os estoques em formação. O mal ajuste dos dados antes de 2005 é devido à falta de dados das lavouras, principalmente para a contabilidade dos estoques em regeneração. Houve uma dificuldade maior para conseguir um bom ajuste neste período que tem um atraso total de 40 anos aproximadamente. Entre 1993 e 2001, houve uma soma de efeitos de alterações climáticas e recuperação de lavouras que dificulta muito definir tempos de atraso e efeitos de preços. Entretanto, o modelo respondeu melhor após 1997. Houve uma grande discrepância em torno de 1996 (erro de 120%).

Os resultados para as taxas de produção podem ser observados na Figura 6.3. Os resultados dos erros e correlações estatísticas calculados estão na Tabela 6.1.



(a)



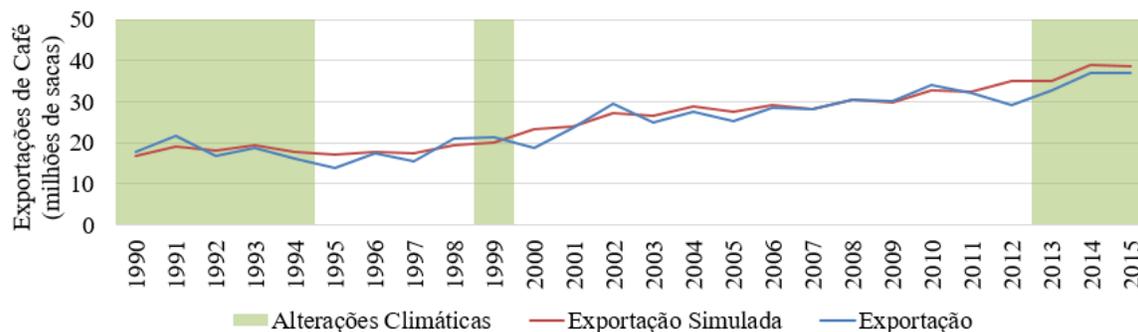
(b)

Figura 6.3 – Resultados de simulação de ajuste das taxas de produção anual (a) e erro absoluto (b).

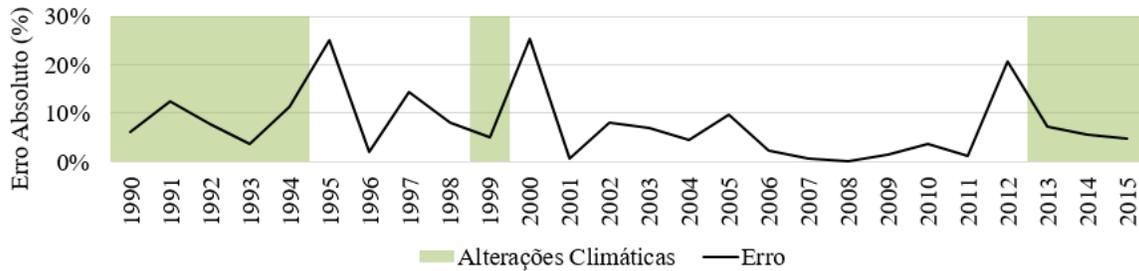
Apesar da dificuldade em ajustar os estoques de árvores, as taxas de produção apresentam um bom comportamento frente aos dados históricos. Os principais pontos de erros de cálculo de produção se despontam como efeitos das alterações climáticas. Os preços de referência para a produtividade ficaram em 100 USCents/lb antes de 1994 e 82 USCents/lb após 1994.

Como visto, as alterações climáticas são diversas e afetam em diferentes características das lavouras e das produtividades. Saber o exato ponto de alteração passa a ser significativo para a melhor estimativa das produções. Um fato importante é observar que as alterações climáticas alteram a bianualidade das lavouras, inclusive podendo invertê-la. Após baixas mais significativas de produção (devido à alteração climática), é observado a recuperação da lavoura com produções mais altas (amplitudes de oscilações maiores). O fator de bianualidade empregado foi de 25% antes de 1994 e 20% após 1994.

Os resultados para as taxas de exportação podem ser observados na Figura 6.4. Os resultados dos erros e correlações estatísticas calculados estão na Tabela 6.1.



(a)



(b)

Figura 6.4 – Resultados de simulação de calibração das taxas de exportação anual (a) e erro absoluto (b).

Os dados históricos de taxas de exportação de 1965 até 1990 foram estimados a partir dos dados entre 1990 e 2015 para formar a série temporal para as análises de ajuste. A principal dinâmica sobre as exportações vem das taxas de produção exportável que, por sua vez, são função das produções. Por isso, aparecem as oscilações de baixa amplitude e alta frequência (reflexo da bianualidade). Mais ainda, somando os efeitos da produção exportável e do valor do *commodity*, retrata-se as baixas nas exportações em meado de 1995 e as altas em meados de 1991 e 2002. O modelo não foi capaz de detectar as baixas de 2012, mas a causa deve estar ligada aos picos de preços de 2011. O efeito proporcional da produção exportável *efpexp* ficou em 25% no período todo. Os preços de referência ficaram em 100 US Cents/lb. Os níveis de estoques de cobertura terminaram 2015 variando entre 2 e 4 (estoques para 2 a 4 meses sem aquisições).

Os resultados para os níveis de estoques de café podem ser observados na Figura 6.5. Os resultados dos erros e correlações estatísticas calculados estão na Tabela 6.1.

Como explicado na seção 2.10, os estoques de passagem são difíceis de estimar porque não existe uma divulgação confiável dos dados. Portanto, foi proposto calcular os estoques deficitários desde 1990 para se ter, no mínimo, os valores anunciados em 2016, cujo a soma é de aproximadamente 15 milhões de sacas. A quantidade deficitária foi calculada em aproximadamente 80 milhões de sacas. Com a contabilização desde dados, foi gerada uma nova série temporal dos estoques de passagem e efetuado as simulações de ajuste. A princípio, as discrepâncias até 2000 são devido aos dados faltantes.

Entre 2000 e 2016, foi atingido uma boa correlação entre os dados e os resultados das simulações. Duas informações adicionais que podem ser avaliadas são: os efeitos das alterações climáticas, que podem motivar movimentos de estoques como entre 1990 e 1994, e as implicações de níveis de estoques baixos (somados as alterações climáticas entre 2013 e

2016). Contudo, existem controvérsias sobre os efeitos de estoques baixos na teoria de gerenciamento de estoques [32].

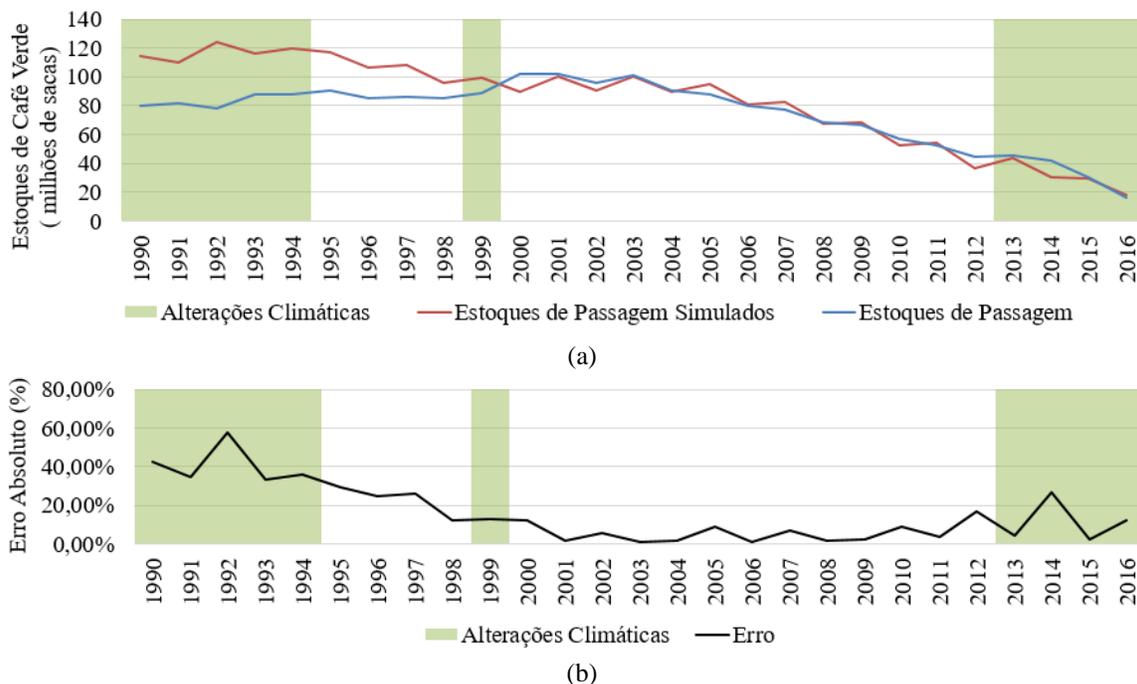


Figura 6.5 – Resultados de simulação de ajuste dos estoques de passagem (a) e erro absoluto (b).

Tabela 6.1 – Análise de erros dos resultados das simulações parciais de ajustes com dados históricos.

Variáveis	MAE/ μ	RMSE/ μ	MAPE	U^m	U^s	U^c	R^2	r
	1/anos	1/anos	%	(adimensional)				
Estoques de Árvores Produtivas Anual	0,0555	0,0049	6,25	0,08	0,04	0,88	0,96	0,98
Estoques de Árvores em Formação Anual	0,1942	0,0953	23,05	0,03	0,00	0,97	0,66	0,81
Produção Anual	0,1712	0,0504	20,04	0,03	0,01	0,96	0,68	0,83
Taxa de Exportação Anual	0,0663	0,0078	7,67	0,17	0,01	0,82	0,92	0,96
Estoques de Café Verde	0,1844	0,0641	15,74	0,24	0,22	0,54	0,77	0,88

Nota: - MAE/ μ é o erro absoluto médio dividido pela média dos dados. RMSE/ μ é a raiz do erro quadrático médio dividido pela média dos dados.
 - MAPE é o erro absoluto médio percentual.
 - U^m , U^s e U^c são os coeficientes de desigualdade de Theil, que particionam o erro quadrático médio (MSE) em frações que são média desigual, variância desigual e covariância desigual, respectivamente.
 - R^2 é o coeficiente de determinação.
 - r é a correlação dos dados ([36] e [42]).

A Figura 6.6 mostra o balanço anual simulado (Produção-Consumo Doméstico-Exportações) entre 1990 e 2016. Como mostrado para os dados históricos, o balanço tem ficado negativo por muito anos de modo mais expressivo, chegando a *déficits* de 15 milhões

em 2011. Também é possível perceber a influência da bianualidade tanto na simulação quando nos dados históricos.

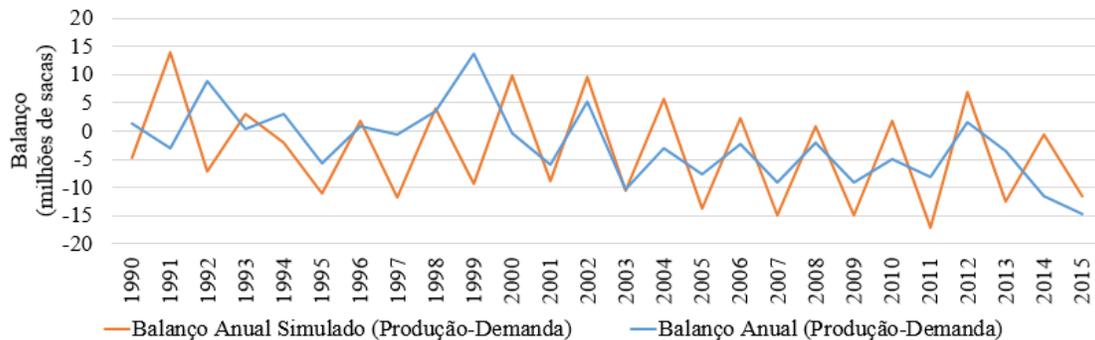


Figura 6.6 – Balanço de produção simulado entre 1990 e 2016.

A Figura 6.7 mostra a relação entre estoques e demandas simulada entre 1990 e 2016. Como para os dados históricos, esta relação tem diminuído por muitos anos. Se considerado os estoques publicados para o cálculo desta relação, quando abaixo de 0,5, os níveis de estoques tendem a influenciar a elevação dos preços.

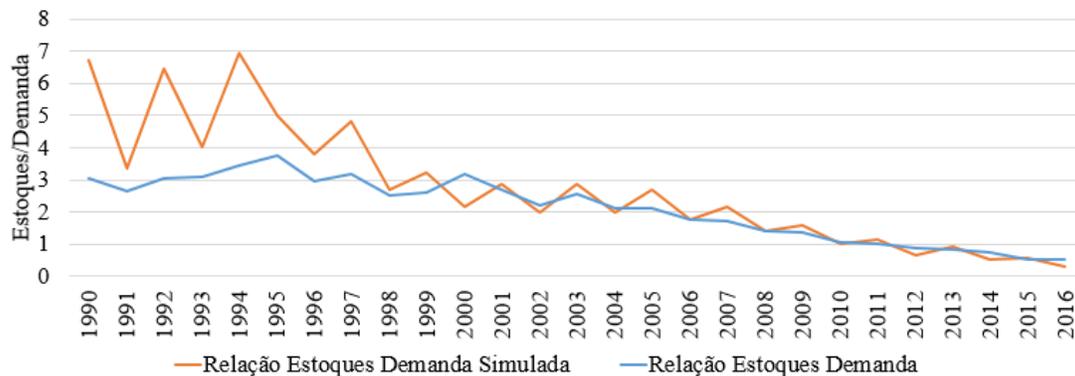


Figura 6.7 – Relação entre os estoques e demandas simulada entre 1990 e 2016.

A Figura 6.8 mostra a relação produção e demandas simulada e indica também níveis abaixo de 1 em muitos anos, o que aponta escassez de produtos.

A Figura 6.9 mostra os resultados simulados de variáveis selecionadas para comparação com os comportamentos descritos no capítulo 2. São tomados os resultados entre dezembro de 2014 e junho de 2016. Todas as variáveis guardam correlação e sincronismo com os dados históricos, exceto as aquisições dos exportadores e das torrefadoras, cujos dados históricos exatos não são conhecidos.

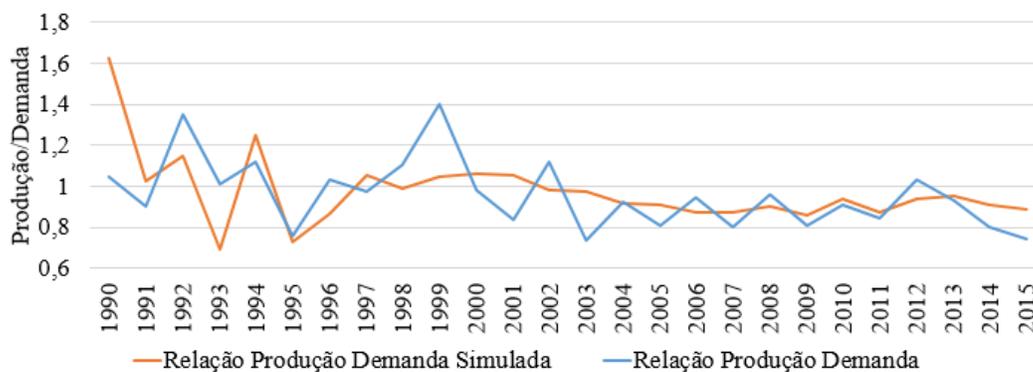


Figura 6.8 – Relação entre as produções e demandas simulada entre 1990 e 2016.

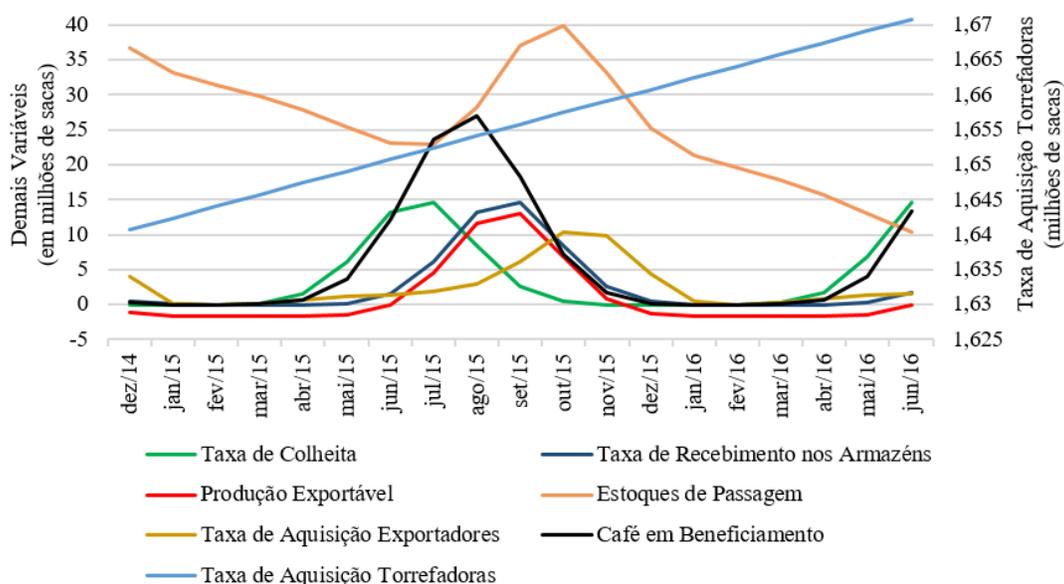


Figura 6.9 – Valores mensais simulados de variáveis selecionadas entre jan/15 e jul/16.

6.2 Simulação de estimação entre 2013 e 2019 (sem efeitos climáticos)

Este cenário de análise busca avaliar o modelo e a situação da cadeia de produção para o caso onde não fossem previstas as secas entre 2013 e 2015 (ou simplesmente não acontecesse a seca). Atuando com o modelo já ajustado na seção 6.1, voltando ao ano de 2013, deveríamos estimar os preços do café (Indicador composto de preços ICO) entre 2013 e 2019 assumindo os ciclos descritos no capítulo 4 e os movimentos dos mercados mundiais. A escolha do horizonte (até 2019) vem do fato dos preços aprestarem um ciclo de queda de, aproximadamente, 8 anos como mostra a Figura 6.10.

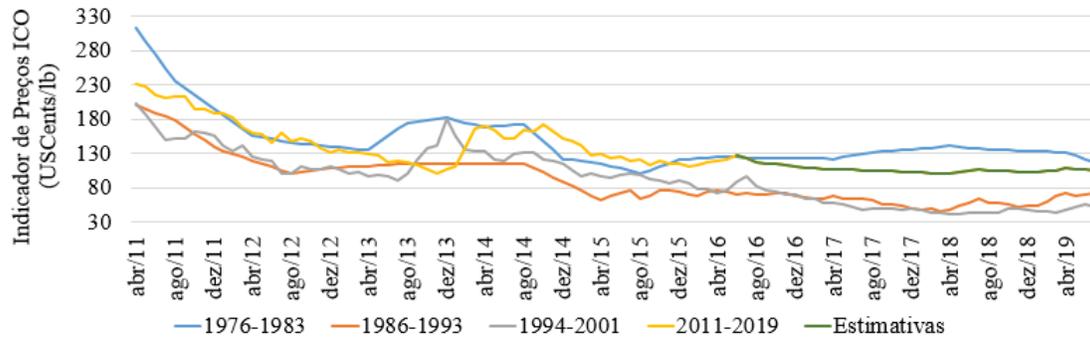


Figura 6.10 – Estimativa de preços (Indicador ICO) para análises sugeridas.

Foram colhidos os preços médios mensais do indicador em três períodos de quedas: 1976 a 1983, 1986 a 1993 e 1994 a 2001, embora tenhamos uma queda constante entre 1976 e 1993 (lembrando que em 1986 os preços reagiram). Os valores entre junho de 2016 e junho de 2019 foram estimados a partir das médias das quedas das séries temporais colhidas como mostra a Figura 6.10. Para representam os preços entre 2013 e 2019 foi adotado a curva de tendência polinomial da série temporal 2011-2019.

Os resultados obtidos para os estoques de árvores indicam um aumento de árvores produtivas, como esperado. Entretanto, os estoques de árvores em formação apresentariam resistência em diminuir com a queda dos preços, mantendo-se na faixa de 1 bilhão de plantas. Isto porque, no período de 2013 a 2019, a queda de preços é mais lenta (os picos ficaram em 2011). Os resultados podem ser vistos na Figura 6.11.

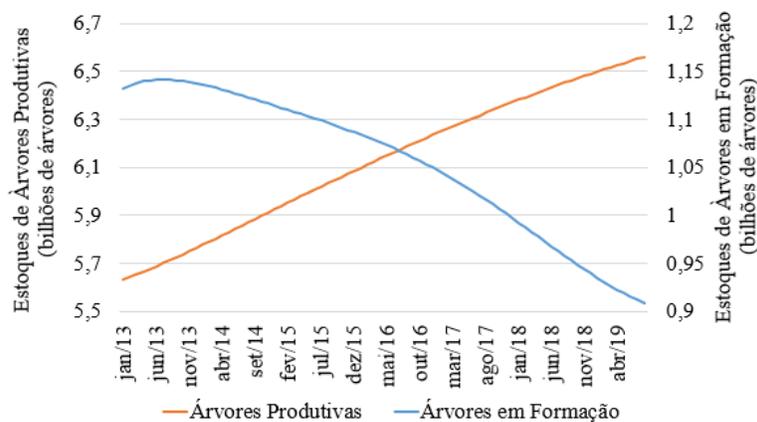


Figura 6.11 – Resultados obtidos para os estoques de árvores para as análises sem efeitos as secas de 2013-2015.

Os resultados das principais variáveis da cadeia podem ser analisados na Figura 6.12.

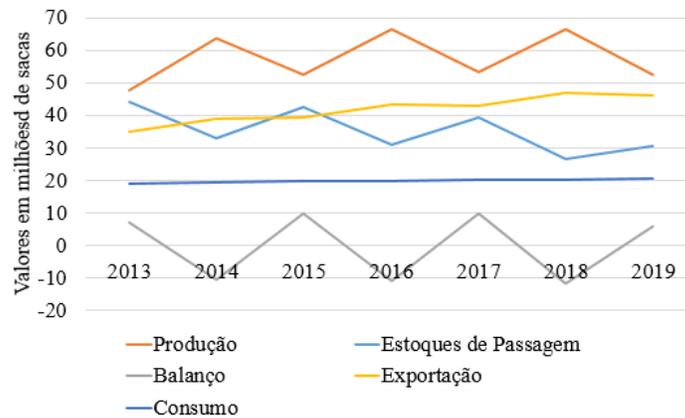


Figura 6.12 – Resultados para as principais variáveis da cadeia de produção do café para as análises sem efeitos das secas de 2013-2015.

A produção de café segue com os efeitos dos desgastes das altas produções, mas a tendência é de aumento sendo que, em 2014, já seriam registradas mais de 60 milhões de sacas produzidas. Os efeitos da bianualidade continuam causando oscilações de baixa amplitude que refletem nos balanços e nos estoques. Entretanto, este fenômeno também já é esperado a menos da confirmação da saturação da produtividade (quando, a princípio, os efeitos da bianualidade podem diminuir). No geral, os estoques seguiriam diminuindo e os balanços oscilariam entre 10 milhões de excedentes e de escassez. As exportações também seguem em ascensão.

Os resultados das relações de suprimento e demanda podem ser vistos na Figura 6.13. As relações entre estoques-demanda e produção-demanda indicam uma queda mesmo num cenário sem seca e de maiores produções. Isto porque os consumos e as exportações se mantêm crescentes e as produções não são grandes o suficiente para compensar essas demandas. As exportações crescem com a possibilidade de excedentes, como descrito anteriormente.

Neste caso, estes fenômenos tenderiam a pressionar os preços para manter em patamares medianos, como já ocorre recentemente e como é apresentado pela estimativa de preços adotada. Importante lembrar que os níveis de estoques publicados vão influenciar na formação de preços. É observado também que, em 2019, teríamos produção deficitária e relação estoques-demandas por volta de 0,5 favorecendo, em termos de economia mundial, a elevação de preços nos anos seguintes.

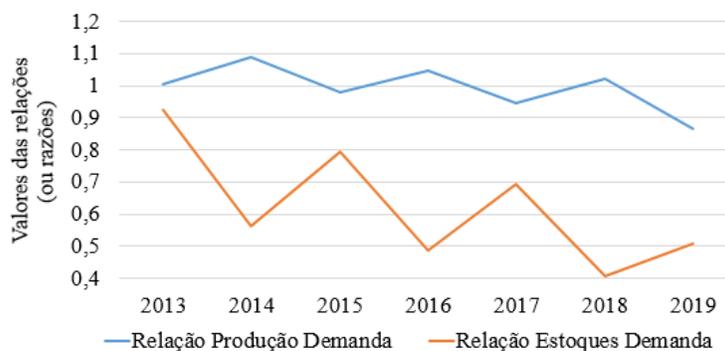


Figura 6.13 - Resultados para as relações suprimento e demanda para as análises sem efeitos das secas de 2013-2015.

6.3 Simulação de estimação entre 2016 e 2019 (com efeitos climáticos)

Este conjunto de análises busca avaliar a situação da cadeia de produção para o caso onde, passadas as secas e não havendo mais alterações climáticas significativas, são tomadas as estimativas de preços entre 2016 e 2019, conforme mostra a Figura 6.10. A justificativa do horizonte de 2019 é o mesmo da análise anterior.

A Figura 6.14 mostra os resultados encontrados para estas análises. Aparentemente, as variáveis apresentam comportamentos semelhantes as análises anteriores, porém os estoques de árvores produtivas são mais baixos e, conseqüentemente, as taxas de produção são mais baixas (esperado por conta do efeito das secas). Em comparação com o cenário anterior, teremos produção superior a 60 milhões somente em 2018. Os estoques de árvores giram em torno de 5,8 bilhões de plantas e isto reflete em todas as outras variáveis.

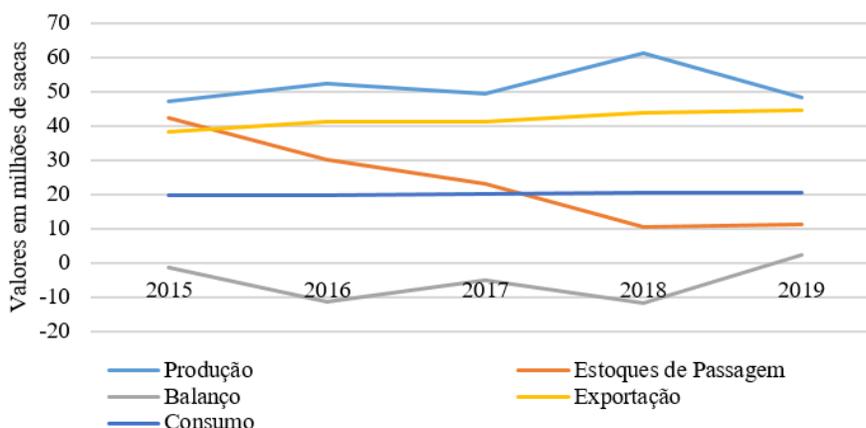


Figura 6.14 - Resultados para as principais variáveis da cadeia de produção do café para as análises com estimativas de preços entre 2016 e 2019.

Neste cenário, os estoques de café verde caem mais, pois os excedentes diminuem mais e as exportações e consumos tendem a se manter nos seus patamares. Os balanços, que mostram esta realidade de escassez, voltam a gerar excedentes somente em 2019, mesmo assim, muito pequeno.

Como dito, os preços reagem as produções e estoques mundiais, que seguem com tendências mais otimistas que o Brasil neste período. Por isso, o movimento dos preços é bem caracterizado pela estimativa adotada na Figura 6.10.

O gráfico da Figura 6.15 reforça a realidade descrita apontando a relação estoque-demanda em queda constantemente. Em 2018, esta relação chega ao dramático valor 0,2. A relação de produção-demanda permanece abaixo de 1 em quase todo período simulado. Após 2019, se concretizado o cenário brasileiro, os preços tendenciarão a reagir mais fortemente subindo.

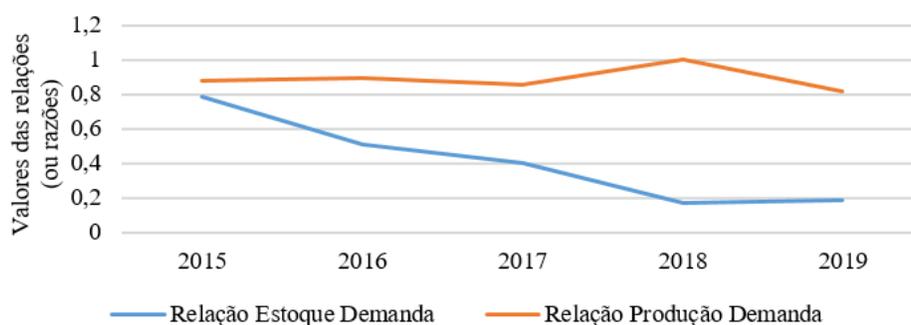


Figura 6.15 - Resultados para as relações suprimento e demanda para as análises com estimativas de preços entre 2016 e 2019.

Neste capítulo, vimos a metodologia adotada para realizar a simulação de ajuste paramétrico e os critérios para interrupção das iterações. Uma tabela contendo os erros e os parâmetros de Theil foi gerada para aferição da precisão dos resultados. Foram gerados gráficos comparando os resultados atingidos e os dados disponíveis. As dificuldades para realização dos ajustes foram discutidas. A partir do modelo ajustado, dois cenários de simulação foram propostos e analisados. Percebemos que, mesmo sem efeito de grandes alterações climáticas, o Brasil deve ter dificuldades em elevar seus níveis de estoques até 2019, supondo que os consumos domésticos e exportações sigam as tendências identificadas.

Capítulo 7

Conclusões

Pierson e Sterman [36] defendem que os gestores podem ser relutantes em aceitar decisões estratégicas importantes para mitigar ciclos e isto pode trazer situações futuras em detrimentos aos mercados. Tal hipótese pode ser aplicada ao mercado do café, uma vez que os produtores, as torrefadoras e os exportadores não devem aceitar restrições e limitações. Inclusive, é uma restrição que propõe Laignelet [27] ao prescrever o correto ajuste do tempo de correção dos estoques, além de atender à média dos consumos. Isto seria possível se tivéssemos a capacidade de restringir as produções sem grandes prejuízos para produtores. Produtores e exportadores tomam suas decisões antecipadas e adaptativas impulsionados pelas correntes de preços, fato que dificulta um controle do suprimento pela capacidade de produção e produção.

Esta dissertação realizou um estudo sobre a cadeia de suprimentos do *commodity* do café brasileiro, apresentando suas principais características e dinâmicas, além de identificar seus pontos mais críticos, tais como as influências dos preços nos investimentos, as dinâmicas dos estoques de árvores, os efeitos das alterações climáticas na capacidade de produção e produção, a formação dos estoques de café verde e as estratégias de mercado das torrefadoras e exportadores.

O modelo dinâmico proposto representa uma parte importante para os produtores da cadeia de suprimentos do café brasileiro. Houve a possibilidade de analisar efeitos de forma qualitativa e quantitativa com a adoção de algum erro admissível. Além disso, foram traçadas hipóteses dinâmicas confiáveis e identificados modos de referência, que se aglutinaram em diagramas de causa-efeito.

Realizou-se a implementação em *software* do modelo matemático. O modelo desenvolvido no *Ithink/Stella Architect* se mostra robusto e amigável, passível de ser facilmente alterado e testado, sem ocorrência de “*bugs*” de sistema, oferecendo várias possibilidades de análises e aprimoramentos. A possibilidade de análise de variáveis exógenas, que causam distúrbios (alterações climáticas), foi implementada.

O uso da função logística foi proposto em substituição ao uso de funções gráficas (*Graphical Function do iThink/Stella*) e esta função se mostrou eficiente neste propósito. As realimentações de estado e os atrasos foram ajustados, com níveis admissíveis de erros (veja Tabela 6.1). Variações no tempo também foram tratadas, como os limites de saturação da função logística que definem parâmetros dos estoques de cobertura das torrefadoras e dos exportadores. O modelo foi ajustado para a situação atual e alguns cenários foram estudados.

O modelo permite que vários outros cenários sejam estudados e permite o correto tratamento e gerenciamento dos fatores de risco. Além disso, pode ser atualizado para receber dinâmicas mais específicas dos produtores, podendo ser individualizado para cada produtor. Este modelo atende ainda às necessidades das cooperativas de produtores de planejar seus estoques, de estimar as produções de seus cooperados e de gerir seus negócios com torrefadoras e exportadores. As cooperativas apresentam um grande potencial de uso desta ferramenta, pois possuem acesso as principais informações dos seus cooperados que alimentam o modelo dinâmico proposto.

7.1 Limitações do modelo

O modelo contém 11 variáveis de estados (estoques), 10 variáveis exógenas (preços, taxas de eliminação e recuperação de árvores por efeitos climáticos, efeitos nas bianualidades, taxas de consumo entre outras), 29 variáveis auxiliares (taxas de aquisição das torrefadoras e exportadores, taxas de colheitas, capacidades de produção dos estoques de árvores, efeitos dos preços das produtividades entre outros) e uma quantidade total de 32 parâmetros passíveis de ajustes (atrasos, declividades, valores de referência de preços, tempos de ajuste de torrefadoras e exportadores, entre outros).

Além disso, uma simplificação adotada para a simulação dos atrasos foi o uso da função *delay3*, que aproxima o atraso através de uma cadeia de três sistemas de primeira ordem. Esta função adiciona mais variáveis de estados ao modelo. Esta função foi aplicada às taxas de entradas e saídas dos estoques do modelo da capacidade de produção e produção. Funções de aproximação de estado de atraso de primeira ordem também foram supostas, mas os resultados não foram satisfatórios.

O grande número de parâmetros no modelo proposto implica na existência de mínimos locais, ocasionando, por sua vez, algumas dificuldades de ajuste utilizando os métodos convencionais de otimização baseados em descida na direção de gradiente. Adicionalmente, a ferramenta de modelagem utilizada (*Stella Architect*) não dispõe de algoritmos de otimização, de modo que os ajustes feitos neste trabalho foram feitos através de iterações manuais, utilizando tentativa e erro.

A área de distribuição é melhor descrita pelos dados e informações coletadas, mas a área de negócios, desempenhada pelas torrefadoras e exportadores, carece de mais informações para a correta determinação dos estoques administrados. O modelo não é capaz de simular os estoques de passagem publicados.

Gelb [18] e Velasquez [46] relatam a necessidade de haver um censo mais adequado das árvores de café, fato que limita melhorias nos modelos. O modelo possui a capacidade de estimar dados úteis, talvez não-mensuráveis como estoques de árvores com produtividade crescente e decrescente, mas algumas variáveis podem não ser modeladas de forma correta como os estoques de árvores não-produtivas, pois existe uma dificuldade em determinar as corretas estratégias de eliminação de plantas.

Apesar de nem todas as possibilidades de comportamentos das variáveis exógenas terem sido simuladas, o modelo não é capaz de responder bem as variáveis mais complexas, como os efeitos das alterações climáticas somado às reações dos produtores, principalmente aos preços, conforme mostra os estoques de árvores em formação simulados.

Os níveis de estoques de cobertura também possuem informações limitadas. Pela pouca informação exposta, os níveis podem possuir relações e dinâmicas complexas. As influências dos preços nos estoques de cobertura foram consideradas somente para as dinâmicas das exportações.

7.2 Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros é apontado o estudo da simplificação e redução do modelo, tanto de suas variáveis de estados quanto os parâmetros ajustáveis. Além disso, para apoio à simplificação do modelo, o uso complementar de outra ferramenta computacional é indicado para otimização, como algoritmos genéticos ou o método Markov chain Monte Carlo (MCMC) [36] para otimizar parâmetros estabelecendo intervalos de

confiança. Existe a possibilidade de uso de ferramentas de software apropriadas para análise de sensibilidade de parâmetros, voltadas para exploração de modelos, como uso de superfícies de resposta (*Design of Experiments* (DOE)) [36].

Também como sugestão para trabalhos futuros é apontada a implementação e análise dos demais ciclos do mercado que foram descritos no capítulo 4, mas não modelados, tais como os ciclos da qualidade, os ciclos dos países importadores e dos mercados futuros. Além disso, outros mecanismos podem ser estudados como os programas de crédito aos produtores e as ferramentas de negócios (uso de contratos e derivativos, por exemplo). Por outro lado, aprimoramentos nas funções e dinâmicas já escritas podem ser feitos, como a correta definição de faixas de histerese para representar as relações entre preços e investimentos, por exemplo. As simulações mostraram uma rica variedade de padrões de comportamento, onde algumas variáveis não são mensuráveis e não observáveis, como os diferentes estoques de árvores. Com a definição de faixas de histereses, comportamentos tipo bifurcações de *Hopf* podem ser analisados (a exemplo de muitos trabalhos correlatos).

Mais ainda, se atingido o devido ajuste dos estoques de passagem, podem ser estudadas as relações que definem ou influenciam os preços com algum erro admissível. A partir disto, o sistema pode ser expandido e retroalimentado para que os preços estimados impliquem em aumento ou diminuição de investimentos. Neste caso, o modelo pode ser ajustado para análise dos mercados mundiais de café e seus impactos nos mercados brasileiros.

Por último, pode ser estudado a competitividade entre os cafés arábico e robusta. É sabido que um produto é substituto do outro, e vice-versa [32]. Especulações de mercado dizem que, em 2016, o arábica de baixa qualidade teve elevação de preços pela procura em substituir o robusta, ultrapassando os valores dos demais arábicas inclusive.

Referências Bibliográficas

- [1] ARANGO, S., DYNER, I., LARSEN, E.R., "Lessons from deregulation: Understanding electricity markets in South America". In: *Utilities Policy*. v. 14, pp. 196–207, 2006a.
- [2] ARANGO, S.A., "Essays on commodity cycles based on expanded Cobweb experiments of electricity markets". In: *System Dynamics Group, Social Science Faculty University of Bergen*, 2006b.
- [3] BACEN, Banco Central do Brasil. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/home>>. Acessado em: 1 Dezembro 2016.
- [4] BARROS, S., BERK, C., "Global Agricultural Information Network Report: Brazil, Coffee Annual, Annual Report.". In: *BR16004. U.S. Department of Agriculture, USA*, 2016.
- [5] BARROS, S., VERDONK, R., "Global Agricultural Information Network Report: Brazil, Coffee , Annual.". In: *BR3006. U.S. Department of Agriculture, USA*, 2003.
- [6] BM&FBOVESPA, Bolsa de Mercadorias e Futuras de São Paulo. Disponível em: <http://www.bmfbovespa.com.br/pt_br/index.htm>. Acessado em: 1 Dezembro 2016.
- [7] CEPEA, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Departamento de Economia, administração e Sociologia, Universidade de São Paulo-USP. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/cafe.aspx>>. Piracicaba, Brasil. Acessado em: 26 Novembro 2016.
- [8] CNA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, "Contrato futuro do Arábica poderia ter proporcionado maior margem líquida em 2015". In: *Boletim Ativos do Café*. v. 9, 2015.
- [9] CNA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, "Análise dos Resultados da Pesquisa CaféPoint Colheita Cafeeira 2016", Brasil, 2016.
- [10] CNC, Conselho Nacional do Café, Disponível em: <<http://www.cncafe.com.br/site/>>. Brasil. Acessado em: 26 Novembro 2016.
- [11] CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, "Acompanhamento da Safra Brasileira: Monitoramento Agrícola – Café – Safra 2016". In: *Brasil*. v. 2., 2016a.
- [12] CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, "Levantamento de Estoques Privados de Café do Brasil". In: *Brasil*. v. 13, pp. 1–20., 2016b.

- [13] CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>>. Brasil. Acessado em: 26 Novembro 2016, 2016c.
- [14] CUTIPA ARAPA, V.J., *Modelagem da Dinâmica da Qualidade de Produtos em um Duopólio*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2014.
- [15] DAVIRON, B., PONTE, S., *The coffee paradox: global markets, commodity trade, and the elusive promise of development*. London ; New York : New York, Zed Books in association with the CTA ; Distributed in the USA by Palgrave Macmillan, 2005.
- [16] DEATON, A., LAROQUE, G., "Estimating a nonlinear rational expectations commodity price model with unobservable state variables". In: *Journal of Applied Econometrics*. v. 10, pp. S9–S40, 1995.
- [17] DECAF, M., "Informe Estatístico do Café: Dezembro/03", vários informes, S.l.: s.n., 2003.
- [18] GELB, A.H., "Optimal Control and Stabilization Policy: An Application to the Coffee Economy". In: *The Review of Economic Studies*. v. 44, pp. 95–109, 1977.
- [19] GOODWIN, R.M., "Dynamical Coupling with Especial Reference to Markets Having Production Lags". In: *Econometrica*. v. 15, pp. 181, 1977.
- [20] HE, X.-Z., WESTERHOFF, F.H., "Commodity markets, price limiters and speculative price dynamics". In: *Journal of Economic Dynamics and Control*. v. 29, pp. 1577–1596, 2005.
- [21] HINES, J., "System Dynamics II: Applications of System Dynamics" S.l.: Massachusetts Institute of Technology-MIT, Sloan School of Management, 2004.
- [22] ICO, International Coffee Organization, "Factors to achieve a balanced market". In: . London, United Kingdom, 2014a.
- [23] ICO, International Coffee Organization, "World coffee trade (1963-2013): A review of the markets, challenges and opportunities facing the sector". In: . London, United Kingdom, 2014b.
- [24] ICO, International Coffee Organization, "The impact of the price of oil and the US dollar exchange rate on coffee prices". In: Italia, 2015.
- [25] ICO, International Coffee Organization, Disponível em: <<http://www.ico.org/>>. Acessado em: 26 Novembro 2016c.

- [26] ISEE, Disponível em: <<http://www.iseesystems.com/store/products/stella-architect.aspx>>. Acessado em: 1 Dezembro 2016.
- [27] LAIGNELET, R. S., *World Coffee Dynamics*. Thesis presented to Georgia Institute of Technology in partial fulfillment of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, April 1976.
- [28] LEWIN, B, GIOVANNUCCI, D, VARANGIS, P, "Coffee Markets: New Paradigms in Global Supply and Demand". In: *Agriculture and Rural Development Discussion Paper 3, World Bank, Washington D.C.* v. 3, 2004.
- [29] MACKEY, M.C., "Commodity price fluctuations: Price dependent delays and nonlinearities as explanatory factors". In: *Journal of Economic Theory*. v. 48, pp. 497–509, 1989.
- [30] MCGARVEY, Bernard & HANNON, Bruce (eds.), *Dynamic Modeling for Business Management*. . New York, Springer-Verlag. Acessado em: 22 Outubro 2016. Modeling Dynamic Systems, 2004.
- [31] MEADOWS, D. L., *The Dynamics of Commodity Production Cycles: A Dynamic Cobweb Theorem*. Massachusetts Institute of Technology-MIT, USA, 1970.
- [32] MEHTA, A., CHAVAS, J.-P., "Responding to the coffee crisis: What can we learn from price dynamics?". In: *Journal of Development Economics*. v. 85, pp. 282–311, 2008.
- [33] MOHAN, S., "Market-based price-risk management for coffee producers". In: *Development Policy Review*. v. 25, pp. 333–354, 2007.
- [34] NAVIDI, W.C., *Principles of statistics for engineers and scientists*. . Dubuque, IA, McGraw-Hill, 2010.
- [35] OSORIO, F.A., ARAMBURO, S.A., "A System Dynamics Model for the World Coffee Market". In: *Proceedings of the 27th International Conference of the System Dynamics Society*. S.l.: s.n., 2009.
- [36] PIERSON, K., STERMAN, J.D., "Cyclical dynamics of airline industry earnings: K. Pierson and J. D. Sterman: Cyclical Dynamics of Airline Industry Earnings". In: *System Dynamics Review*. v. 29, pp. 129–156, 2013.
- [37] SAEED, K., "Defining a problem or constructing a reference mode". In: . Worcester, MA 01609, USA, 1999.
- [38] SLOTINE, J.-J.E., LI, W., *Applied nonlinear control*. S.l., Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.

- [39] STERMAN, J.D., "Deterministic chaos in an experimental economic system". In: *Journal of Economic Behavior & Organization*. v. 12, pp. 1–28, 1989a.
- [40] STERMAN, J.D., "Misperceptions of feedback in dynamic decision making". In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. v. 43, pp. 301–335, 1989b.
- [41] STERMAN, J.D., "Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment". In: *Management Science*. v. 35, pp. 321–339, 1989c.
- [42] STERMAN, J.D., *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. . Nachdr. Boston, Irwin/McGraw-Hill, 2009.
- [43] USDA, "Coffee: World Markets and Trade", USA, S.l.: s.n., 2016a.
- [44] USDA. Disponível em: <<https://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome>>. Acessado em: 28 Dezembro 2016b.
- [45] VALENTE, M.L.C., BRAGA, M.J., "Causalidade e co-integração no mercado de café entre a BM&F e a NYBOT.". In: *Revista de Economia e Administração*. v. 5, 2006.
- [46] VELASQUEZ, P.J.F., "A System Dynamics Study of Instability in the Colombian Coffee Market". In: *System Dynamics Group, Department of Geography, University of Bergen*, 2010.
- [47] VENTANA, Systems Inc, Vensim Software Disponível em: <https://vensim.com/>. Acessado em: 28 Dezembro 2016.
- [48] VIEIRA, T.G., ALVES, H.M., SOUZA, V.C., et al., "Dinâmica da ocupação de áreas cafeeiras de Minas Gerais utilizando geotecnologias". Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2005.
- [49] WHELAN, J., MSEFER, KAMIL, CHOGE, NATHANIEL, "Economic Supply and Demand". S.l.: Massachusetts Institute of Technology-MIT, USA, 2003.

Apêndice A

Definições

A.1 Dados e informações complementares

Tipos de café e grupos de preços

Basicamente, existem dois tipos de café: Arábica e Robusta ou Conilon. O café Arábica é considerado superior ao robusta. Por isso, em muitos mercados, o Robusta é empregado como substituto do Arábico quando os preços do Arábico estão muito alto. O Robusta é empregado nos cafés expressos e instantâneos. Na economia do café, existem vários indicadores de preços, internacionais e regionais. Os indicadores internacionais mais importantes são o *ICO Composite Price*, indicador composto calculado pela Organização Internacional do Café, e os indicadores por grupos de café. São quatro os indicadores de grupos de café: *Colombian Milds*, *Brazilian Naturals*, *Other Milds e Robustas*. Os três primeiros tipos são grupos de café arábica. O indicador ICO pondera todos os tipos de grupos de café. Durante os estudos realizados, foram identificadas correlações estatísticas fortes e movimentos extremamente semelhantes de todos os indicadores de preços ([22] e [23]).

Determinação dos dados faltantes e estimações

Para a determinação de dados faltantes e estimações de informações, além de apoio a determinação das faixas de atuação dos parâmetros do modelo (ou da ordem de grandeza dos parâmetros), antes de buscar efetivas calibrações e simulações no *iThink/Stella*, foi empregado o método *Generalized Reduced Gradiente* (GRG), método não-linear de otimização, por meio do *software MS-Excel 2013* buscando a minimização da soma dos erros quadráticos das variáveis alvo.

Mercados Futuros e Teoria dos Estoques

Contratos a Termo são acordos de compra e venda de uma certa quantidade de café, para entrega em uma data no futuro com um certo preço. A vantagem deste contrato é o preço

predeterminado, não sofrendo as variações de mercado. Contratos Futuros são contratos de compra e venda de uma certa quantidade de café, com uma qualidade mínima, com entrega em um determinado lugar e com uma data de execução. Contratos Futuros não implicam necessariamente em entrega de produtos. Estes contratos podem ser utilizados como estratégia de proteção a riscos (*hedge* de mercado). Contratos de opção proveem direito, mas não obrigação de compra ou vender café a um preço em um dado período. Um prêmio é pago para se ter o direito. Estes contratos também são empregados como estratégias de risco contra mudanças de preços ([22] e [23]).

Existem dois tipos de Mercados Futuros cotados em bolsas para o café: Futuro do Arábico de Nova York e Futuro do Robusta de Londres. O aumento e a diminuição das atividades desses mercados estão relacionados aos métodos de análises gráficas e de dados históricos para previsão de tendências futuras, além das análises dos comportamentos das variáveis. Administradores de fundos e especuladores compram e vendem posições com base nestes métodos. Segundo autores [23], nenhum desses métodos parece ser capaz de capturar a real dinâmica dos mercados. Entretanto, estes métodos e estratégias de mercado podem definir a evolução dos preços no curto prazo (alguns dias) e gerar volatilidade de preços. Resumindo, os agentes de mercados com seus métodos inadequados geram volatilidades. As dinâmicas dos mercados futuros não geram volatilidades. As dinâmicas podem sim minimizar os efeitos dos agentes.

Em termos de preços futuros (*Future Prices*) e físicos (*Spot Prices*). *Contango* é a situação onde os preços futuros de um *commodity* estão acima dos preços. Nesta situação, os produtores de *commodities*, entre outros agentes, realizam *hedge*, onde investidores/compradores estão dispostos a pagar mais no presente por um *commodity* em algum ponto no futuro do que os preços estimados no mesmo ponto no futuro. Isto pode ser devido ao desejo em se pagar um prêmio para ter a mercadoria no futuro, em vez de pagar os estoques, manutenções e transportes com a compra na data presente.

O oposto do *contango* é o *Backwardation*, quando os preços futuros estão abaixo dos preços. Esta situação é favorável para os investidores que possuem posições longas, uma vez que querem que os preços futuros subam para o nível dos preços esperados e, assim, obter ganhos.

A teoria dos estoques descreve as seguintes características dos mercados futuros: (i) Quando a disponibilidade de suprimentos é alta e os estoques dos consumidores são controlados para um mínimo, os preços futuros tendem a ficar em *contango*, a volatilidade dos preços tendem a ser baixa e os prêmios futuros aumentam para os custos de estocagem; (ii) Quando os suprimentos estão baixos e os produtores aumentam os níveis de produção para garantir disponibilidade, os preços futuros tendem a *backwardation* e a volatilidade dos preços sobe.

Função *DELAY3()* do Software *iThink/Stella*

Esta função calcula um atraso de terceira ordem das entradas, usando um tempo de atraso exponencial a partir do atraso informado, e um valor opcional inicial de atraso. A função apresenta uma estrutura de atraso de terceira ordem em cascata, conforme a Figura A.1. A função devolve o valor final dos atrasos da cascata.

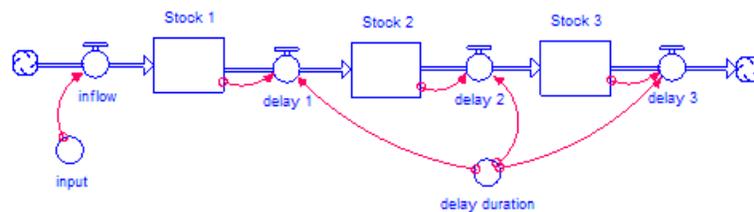


Figura A.1 – Descrição gráfica da função *DELAY3()* do software *Ithink/Stella* [26].

Pode ser observado o código da função *DELAY3(<input>, <delay duration>, [<initial>])* abaixo:

```

INIT Stock_1 = INIT Stock_2 = INIT Stock_3 = input or specified initial value times duration_delay/3
inflow = input
delay_1 = Stock_1/(delay_duration/3)
delay_2 = Stock_2/(delay_duration/3)
delay_3 = Stock_3/(delay_duration/3)
input = some variable or constant
delay_duration = some variable or constant

```

Apêndice B

Dados estatísticos

B.1 Dados estatísticos e correlações

Tabela B.1: Correlações estatísticas entre os estoques de árvores em formação e os principais indicadores de preços, custo e lucro.

Atraso entre os indicadores e os estoques de árvores em formação	Indicador ICO Composite Price	Indicador Colombian Milds	Indicador Other Milds	Indicador Brazilian Naturals	Indicador Robustas	Indicador ICO Composite Prices Paid to Growers	Custo Total Médio	Lucros dos produtores	Indicador ESALQ/USP	Indicador ESALQ/USP
(Anos)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(Reais)	(USCents/lb)
0	0,11	0,13	0,10	0,07	0,12	0,18	0,26	-0,42	0,05	0,06
1	0,39	0,44	0,40	0,40	0,32	0,44	0,43	0,00	0,27	0,38
2	0,64	0,71	0,67	0,68	0,53	0,68	0,84	-0,05	0,70	0,83
3	0,78	0,85	0,80	0,78	0,66	0,81	0,98	-0,77	0,79	0,90
4	0,90	0,93	0,92	0,86	0,82	0,89	0,96	-0,59	0,82	0,88
5	0,86	0,76	0,82	0,82	0,80	0,82	-	-	-	-
6	0,44	0,27	0,34	0,39	0,48	0,41	-	-	-	-
7	0,16	-0,07	0,00	0,07	0,25	0,09	-	-	-	-

Nota:

- Foram considerados os dados de estoques de árvores em formação entre 2002 e 2013 publicados pela CONAB [13].
- Os lucros são calculados subtraindo o custo total médio dos preços pagos aos produtores.
- Os Preços compostos pagos aos produtores foram calculados de acordo com os indicadores de preços pagos aos produtores, definidos para cada grupo de café, seguindo a mesma combinação dada para o cálculo do preço composto ICO.
- As correlações faltantes foram descartadas devido à falta de dados consistentes.

Fonte de dados: CONAB, 2016 [13]; ICO, 2016 [25] e ESALQ/USP, 2016 [7].

Tabela B.2: Correlações estatísticas entre os índices de produtividade anuais e os principais indicadores de preços, custo e lucro.

Atraso entre os indicadores e os estoques de árvores em formação	Indicador ICO Composite Price	Indicador Colombian Milds	Indicador Other Milds	Indicador Brazilian Naturals	Indicador Robustas	Indicador ICO Composite Prices Paid to Growers	Custo Total Médio	Lucros dos produtores	Indicador ESALQ/USP	Indicador ESALQ/USP
(Anos)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(Reais)	(USCents/lb)
0	0,05	0,08	0,05	0,02	0,02	0,09	0,13	-0,19	-0,06	0,00
1	0,24	0,30	0,25	0,25	0,17	0,28	0,27	0,00	0,07	0,22
2	0,44	0,53	0,47	0,49	0,38	0,50	0,85	-0,10	0,69	0,82
3	0,66	0,68	0,66	0,66	0,65	0,69	0,99	-0,67	0,88	0,97
4	0,84	0,82	0,86	0,83	0,78	0,82	0,98	-0,52	0,90	0,94
5	0,82	0,79	0,85	0,83	0,67	0,76	-	-	-	-
6	0,36	0,21	0,27	0,33	0,41	0,33	-	-	-	-
7	0,20	-0,05	0,01	0,08	0,35	0,10	-	-	-	-

Nota:

- Foram considerados os dados de estoques de árvores produtivas e a produção de café anual entre 2002 e 2013 publicados pela CONAB [13].
- Os lucros são calculados subtraindo o custo total médio dos preços pagos aos produtores.
- Os Preços compostos pagos aos produtores foram calculados de acordo com os indicadores de preços pagos aos produtores, definidos para cada grupo de café, seguindo a mesma combinação dada para o cálculo do preço composto ICO.
- As correlações faltantes foram descartadas devido à falta de dados consistentes.

Fonte de dados: CONAB, 2016 [13]; ICO, 2016 [25] e ESALQ/USP, 2016 [7].

Tabela B.3: Correlações estatísticas entre os níveis de estoques de café verde no Brasil e os principais indicadores de preços, custo e lucro.

Atraso entre os estoques de café e os indicadores	Indicador ICO Composite Price	Indicador Colombian Milds	Indicador Other Milds	Indicador Brazilian Naturals	Indicador Robustas	Indicador ICO Composite Prices Paid to Growers	Custo Total Médio	Lucros dos produtores	Indicador ESALQ/USP	Indicador ESALQ/USP
(Anos)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(USCents/lb)	(Reais)	(USCents/lb)
0	-0,93	-0,83	-0,89	-0,86	-0,88	-0,90	-0,93	0,28	-0,84	-0,87
1	-0,92	-0,90	-0,89	-0,90	-0,88	-0,95	-0,95	0,29	-0,87	-0,91
2	-0,77	-0,83	-0,78	-0,74	-0,74	-0,81	-0,90	0,50	-0,72	-0,78
3	-0,74	-0,80	-0,76	-0,73	-0,62	-0,76	-0,79	0,21	-0,65	-0,68
4	-0,57	-0,59	-0,56	-0,53	-0,51	-0,63	-0,60	-0,03	-0,67	-0,51
5	-0,44	-0,44	-0,45	-0,43	-0,36	-0,51	-0,55	0,20	-0,55	-0,40
6	-0,29	-0,22	-0,33	-0,31	-0,24	-0,34	-0,27	-0,16	-0,64	-0,21
7	-0,93	-0,83	-0,89	-0,86	-0,88	-0,90	-0,93	0,28	-0,84	-0,87

Nota:

- Foram considerados os dados de estoques de árvores produtivas e a produção de café anual entre 2002 e 2013 publicados pela CONAB [13].
- Os lucros são calculados subtraindo o custo total médio dos preços pagos aos produtores.
- Os Preços compostos pagos aos produtores foram calculados de acordo com os indicadores de preços pagos aos produtores, definidos para cada grupo de café, seguindo a mesma combinação dada para o cálculo do preço composto ICO.
- As correlações faltantes foram descartadas devido à falta de dados consistentes.

Fonte de dados: CONAB, 2016 [13]; ICO, 2016 [25] e ESALQ/USP, 2016 [7].

Tabela B.4: Correlações estatísticas entre o indicador de preços do café arábico CEPEA/ESALQ/USP e as cotações dos contratos futuros do café arábico com vencimento em setembro/15 (CFEU15).

Atraso entre o indicador e a cotação dos contratos Futuros	(Anos)	0	1	2	3	4
Cotação dos Contratos Futuros do Café Arábico (CFEU15)	(Reais)	0,24	0,63	0,93	0,91	0,76

Apêndice C

Códigos implementados

C.1 Códigos *iThink/Stella* do Capítulo 3

Código das equações *iThink/Stella* para o cenário traçado no capítulo 3, na seção 3.3:

```
Stock(t) = Stock(t - dt) + (Production_Rate - Consumption_Rate) * dt
INIT Stock = 100
INFLOWS:
Production_Rate = Desired_Stock - Stock * Adjustment_Time * DELAY(Stock, General_Delay)
OUTFLOWS:
Consumption_Rate = 50 * EXP(1/100 * time)
Adjustment_Time = 1/20
Desired_Stock = 150
General_Delay = 1
Stock_Dot = Production_rate - Consumption_Rate
```

C.2 Códigos *iThink/Stella* do Capítulo 5

Código das equações *iThink/Stella* para o modelo dinâmico desenvolvido no capítulo 5:

```
Top-Level Model:
Holders_Inventory(t) = Holders_Inventory(t - dt) + (Holders_Acquisition_Rate - Export_Rate) * dt
INIT Holders_Inventory = 4000000
INFLOWS:
Holders_Acquisition_Rate = Desired_HAR
OUTFLOWS:
Export_Rate = Export_Demand
Roaster_Inventory(t) = Roaster_Inventory(t - dt) + (Roaster_Acquisition_Rate - Domestic_Consumption_Rate) * dt
INIT Roaster_Inventory = 2000000
INFLOWS:
Roaster_Acquisition_Rate = Desired_RAR
OUTFLOWS:
Domestic_Consumption_Rate = Domestic_Demand
Total_Consumption(t) = Total_Consumption(t - dt) + (DCR) * dt
INIT Total_Consumption = 0
INFLOWS:
DCR = Domestic_Consumption_Rate
Total_Exports(t) = Total_Exports(t - dt) + (ER) * dt
INIT Total_Exports = 0
INFLOWS:
ER = Export_Rate
A = 129e6
a3 = 2 * 0.35e6
a4 = 2 * (22 - (TIME/618)) * 20
```

a5 = 200
Annual_TC = Total_Consumption-TC_Previous_Year
Annual_TE = Total_Exports-TE_Previous_Year
*b3 = 0.65*1e6*
*b4 = -(22-(TIME/618)*20)*
b5 = 0
*DC1 = IF TIME >=299 THEN 0 ELSE 278941.4291*EXP(0.003126708*TIME)*
*DC2 = IF TIME<299 THEN 0 ELSE (IF TIME <= 540 THEN 278941.4291*EXP(0.003126708*TIME) ELSE 0)*
*DC3 = IF TIME > 540 THEN 1710*TIME+620000 ELSE 0*
Desired_HAR = Expected_Export_Demand+HI_Adjust
*Desired_HI = Export_Demand*Desired_HI_Coverage*
*Desired_HI_Coverage = (26-(TIME/618)*23)*0+Price_Effctcs_on_DHIC*1*
Desired_RAR = Expected_Domestic_Demand+RI_Adjust
*Desired_RI = Domestic_Demand*Desired_RI_Coverage*
*Desired_RI_Coverage = (12-(TIME/618)*6)*
*Domestic_Demand = 1*DC1+1*DC2+1*DC3*
E = 0.5
EC_Expected_Availability =
*Production_Capacity_Expected+HISTORY(Production_and_Gross_Stocks.Gross_Stock,11+12*Production_and_Gross_Stocks.Years)*
*ET1 = IF TIME <=299 THEN 559875.2435*EXP(0.002809064*TIME) ELSE 0*
*ET2 = IF TIME >299 THEN 559875.2435*EXP(0.002809064*TIME) ELSE 0*
*Expected_Domestic_Demand = (TREND(Domestic_Demand, 12)+1)*Domestic_Demand*
*Expected_Export_Demand = (TREND(Export_Demand, 12)+1)*Export_Demand*
*Export_Demand = 1*Export_Trend+1*Price_Effctcs_on_ED+1*EXPP_Effects_on_ED*
*Export_Trend = 1*ET1+1*ET2*
*EXPP_Effects_on_ED = DELAY(Production_and_Gross_Stocks.Exportable_Production*0.25,12)*
GO_Effects_on_Exp_Price = DELAY3(a5/(1+EXP(-k6(Production_and_Gross_Stocks.Gross_Stock-gs0)))-b5,GOE_on_ED_Delay)*
GOE_on_ED_Delay = 1
gs0 = 120000000
HI_Adjust = HI_Deviation/HI_Adjust_Time
HI_Adjust_Time = 3
HI_Deviation = Desired_HI-Holders_Inventory
ICO_Composite_Price = GRAPH(TIME)
(0,0, 37,5), (1,00162074554, 37,8906), ... (616,998379254, 119,91), (618,0, 127,05)
ICO_Price_ref1 = 100
ICO_Price_Ref2 = 75
k4 = 0.003
k5 = 0.005
k6 = -0.001
PE_on_DHIC_Delay = 6
PE_on_ED_Delay = 2
*price = ((Production_and_Gross_Stocks.Gross_Stock)/A)^-E*107*
Price_Effctcs_on_DHIC = a4/(1+EXP(-k5(DELAY3(TREND_ICO_Price, PE_on_DHIC_Delay)-ICO_Price_Ref2))))-b4*
Price_Effctcs_on_ED = a3/(1+EXP(k4(DELAY3(SMT_ICO_Price, PE_on_ED_Delay)-ICO_Price_ref1))))-b3*
*Price_Paid_to_Growers = 0.648*SMT_ICO_Price+8.6885*
Production_Capacity_Expected =
*HISTORY(PC.Production_Capacity_Total_for_Expectancy,11+12*Production_and_Gross_Stocks.Years)*
Production_Capacity_Total_for_Haverst = PC.Production_Capacity_Total
RI_Adjust = RI_Deviation/RI_Adjust_Time
RI_Adjust_Time = 3
RI_Deviation = Desired_RI-Roaster_Inventory
SMT_ICO_Price = SMTH1(ICO_Composite_Price,2)
*TC_in_December = HISTORY(Annual_TC,12*Production_and_Gross_Stocks.Years)*
*TC_Previous_Year = HISTORY(Total_Consumption,12*Production_and_Gross_Stocks.Years)*
*TE_in_December = HISTORY(Annual_TE,12*Production_and_Gross_Stocks.Years)*
*TE_Previous_Year = HISTORY(Total_Exports,12*Production_and_Gross_Stocks.Years)*

$TREND_ICO_Price = (TREND(ICO_Composite_Price, 12)+1)*ICO_Composite_Price$

Import_Country:

$Inventory_IC(t) = Inventory_IC(t - dt) + (Imports_Rate - Shipments_IC_Rate) * dt$

INIT Inventory_IC = 1000

INFLOWS:

Imports_Rate = Inv_IC_minus_Des_Inv

OUTFLOWS:

Shipments_IC_Rate = Demand_IC

Demand_IC = Disappearance+Re_exports

Disappearance = 0.3*(3881.40825223825*TIME+3969991.5151522)

Effects_Inv_on_Price = Inventory_Ratio

Inv_IC_minus_Des_Inv = Inventory_IC

Inventory_Ratio = Inventory_IC

Re_exports = 0.3*164292.2039*EXP((1/194.837514583875)*TIME)

PC:

$Biennial(t) = Biennial(t - dt) + (Count24) * dt$

INIT Biennial = 0

INFLOWS:

Count24 = PULSE(1,24,24)

$Descending_Productivity_Trees(t) = Descending_Productivity_Trees(t - dt) + (Descending_Productivity_Trees_Rate +$

$Regeneration_Trees_Rate - Non_Productive_Trees_Rate - Climate_Effects_on_DPT) * dt$

INIT Descending_Productivity_Trees = 1100000000

INFLOWS:

Descending_Productivity_Trees_Rate = DELAY3(Maturing_Trees_Rate,Descending_ProductivityTrees_Delay)

Regeneration_Trees_Rate =

DELAY3(Non_Productive_Trees_Save_Rate,Regeneration_Trees_Delay)+DELAY3(Climate_Effects_on_RT,Regeneration_Trees_Delay-1.5*12)

OUTFLOWS:

Non_Productive_Trees_Rate =

DELAY3(Descending_Productivity_Trees_Rate,Non_Productive_Trees_Delay)+DELAY3(Regeneration_Trees_Rate,Non_Productive_Trees_Delay)

Climate_Effects_on_DPT = CEout2+CEout1

$Growing_New_Trees(t) = Growing_New_Trees(t - dt) + (Planting_Trees_Rate + Climate_Effects_on_GNT -$

$Maturing_Trees_Rate) * dt$

INIT Growing_New_Trees = 50000000/2

INFLOWS:

Planting_Trees_Rate = Price_Effects_on_Planting

Climate_Effects_on_GNT = IF TIME<=347 THEN 0 ELSE (IF TIME<=401 THEN (1.7e9/54)/2 ELSE 0)

OUTFLOWS:

Maturing_Trees_Rate =

DELAY3(Planting_Trees_Rate,Maturing_Trees_Delay)+DELAY3(Climate_Effects_on_GNT,Maturing_Trees_Delay-1.5*12)

$Lost_Trees_for_Climate(t) = Lost_Trees_for_Climate(t - dt) + (Climate_Effects_on_PT + Climate_Effects_on_DPT -$

$Climate_Effects_on_GNT - Climate_Effects_on_RT) * dt$

INIT Lost_Trees_for_Climate = 0

INFLOWS:

Climate_Effects_on_PT = CEout2+CEout1

Climate_Effects_on_DPT = CEout2+CEout1

OUTFLOWS:

Climate_Effects_on_GNT = IF TIME<=347 THEN 0 ELSE (IF TIME<=401 THEN (1.7e9/54)/2 ELSE 0)

Climate_Effects_on_RT = IF TIME<=347 THEN 0 ELSE (IF TIME<=401 THEN (1.7e9/54)/2 ELSE 0)

$Non_Productive_Trees(t) = Non_Productive_Trees(t - dt) + (Non_Productive_Trees_Rate - Discart_Old_Trees_Rate -$

$Non_Productive_Trees_Save_Rate) * dt$

INIT Non_Productive_Trees = 20000000

INFLOWS:

$Non_Productive_Trees_Rate = DELAY3(Descending_Productivity_Trees_Rate, Non_Productive_Trees_Delay) + DELAY3(Regeneration_Trees_Rate, Non_Productive_Trees_Delay)$
OUTFLOWS:
 $Discart_Old_Trees_Rate = (1 - Price_Effects_on_Saving_Trees) * Non_Productive_Trees$
 $Non_Productive_Trees_Save_Rate = Price_Effects_on_Saving_Trees * Non_Productive_Trees$
 $Productive_Trees(t) = Productive_Trees(t - dt) + (Maturing_Trees_Rate - Descending_Productivity_Trees_Rate - Climate_Effects_on_PT) * dt$
 $INIT Productive_Trees = 1100000000$
INFLOWS:
 $Maturing_Trees_Rate = DELAY3(Planting_Trees_Rate, Maturing_Trees_Delay) + DELAY3(Climate_Effects_on_GNT, Maturing_Trees_Delay - 1.5 * 12)$
OUTFLOWS:
 $Descending_Productivity_Trees_Rate = DELAY3(Maturing_Trees_Rate, Descending_Productivity_Trees_Delay)$
 $Climate_Effects_on_PT = CEout2 + CEout1$
 $Regeneration_Trees(t) = Regeneration_Trees(t - dt) + (Non_Productive_Trees_Save_Rate + Climate_Effects_on_RT - Regeneration_Trees_Rate) * dt$
 $INIT Regeneration_Trees = 500000000 / 3$
INFLOWS:
 $Non_Productive_Trees_Save_Rate = Price_Effects_on_Saving_Trees * Non_Productive_Trees$
 $Climate_Effects_on_RT = IF TIME <= 347 THEN 0 ELSE (IF TIME <= 401 THEN (1.7e9/54)/2 ELSE 0)$
OUTFLOWS:
 $Regeneration_Trees_Rate = DELAY3(Non_Productive_Trees_Save_Rate, Regeneration_Trees_Delay) + DELAY3(Climate_Effects_on_RT, Regeneration_Trees_Delay - 1.5 * 12)$
 $a1 = IF TIME <= 335 THEN 10000000 * 3.50 ELSE 10000000 * 4.00$
 $a2 = IF TIME <= 335 THEN 2 * 0.33 ELSE 2 * 0.33$
 $b1 = 0$
 $b2 = IF TIME <= 335 THEN 1 * 0.33 + 0.1 ELSE 1 * 0.33$
 $Bearing_Trees = Productive_Trees + Descending_Productivity_Trees$
 $Biennial_Factor = IF TIME <= 335 THEN 0.25 * Climate_Effects_on_Biennial_Factor ELSE 0.20 * Climate_Effects_on_Biennial_Factor$
 $CEout1 = IF TIME <= 300 THEN 0 ELSE (IF TIME <= 347 THEN (1.7e9/48)/2 ELSE 0)$
 $CEout2 = IF TIME <= 575 THEN 0 ELSE (IF TIME <= 618 THEN (458.0835461e6/43)/2 ELSE 0)$
 $Climate_Effects_on_Biennial_Factor = IF TIME <= 575 THEN 1 ELSE (IF TIME <= 618 THEN 0.5 ELSE 1)$
 $Climate_Effects_on_Productivity = IF TIME <= 575 THEN 1 ELSE (IF TIME <= 618 THEN 0.85 ELSE 1)$
 $Descending_Productivity_Trees_Delay = IF TIME <= 335 THEN 10.0 * 12 - 1 ELSE 10.0 * 12 - 1$
 $DPT_Productivity_AVG = 0.008929$
 $DPTP_Delay = IF TIME <= 335 THEN 3 * 12 ELSE 3 * 12$
 $Effective_Operational_Cost = 0$
 $Grower_Income = .Price_Paid_to_Growers - Effective_Operational_Cost$
 $k1 = IF TIME <= 335 THEN 0.20 ELSE 0.02$
 $k2 = IF TIME <= 335 THEN 0.20 ELSE 0.02$
 $k3 = IF TIME <= 335 THEN 0.004 ELSE 0.04$
 $Maturing_Trees_Delay = IF TIME <= 335 THEN 3 * 12 - 1 ELSE 3 * 12 - 1 + 6$
 $Non_Bearing_Trees = Growing_New_Trees + Regeneration_Trees$
 $Non_Productive_Trees_Delay = IF TIME <= 335 THEN 26.0 * 12 - 1 ELSE 20.0 * 12 - 1$
 $Planting_Trees_Delay = 1$
 $PPG_Smoothing = SMTH1(.Price_Paid_to_Growers, 2)$
 $pppref1 = IF TIME <= 335 THEN 105 ELSE 105$
 $pppref2 = IF TIME <= 335 THEN 105 ELSE 105$
 $pppref3 = IF TIME <= 335 THEN 100 ELSE 82$
 $Price_Effects_on_Planting = a1 / (1 + EXP(-k1 * (DELAY3(PPG_Smoothing, Planting_Trees_Delay) - pppref1))) - b1$
 $Price_Effects_on_Productivity = a2 / (1 + EXP(-k3 * (PPG_Smoothing - pppref3))) - b2$
 $Price_Effects_on_Saving_Trees = 1 / (1 + EXP(-k2 * (PPG_Smoothing - pppref2)))$

Production_Capacity_DPT =
*DPT_Productivity_AVG***Climate_Effects_on_Productivity**(1+*DELAY3*(*Price_Effects_on_Productivity*,*DPTP_Delay*))**Descending_Productivity_Trees*
Production_Capacity_PT =
*PT_Productivity_AVG***Climate_Effects_on_Productivity**(1+*DELAY3*(*Price_Effects_on_Productivity*,*PTP_delay*))**Productive_Trees*
Production_Capacity_Total = (1-
*swich_Biennial***Biennial_Factor*)*(*Production_Capacity_DPT*+*Production_Capacity_PT*)
Production_Capacity_Total_for_Expectancy = (1-
*Biennial_Factor***swich_Biennial_Reverse*)*(*Production_Capacity_DPT*+*Production_Capacity_PT*)*(1+0.0)
PT_Productivity_AVG = 0.01088
PTP_delay = IF *TIME* <= 335 THEN 3*12 ELSE 3*12
Regeneration_Trees_Delay = IF *TIME* <= 335 THEN 3*12-1 ELSE 3*12-1+6
swich_Biennial = IF *TIME* <= 335 THEN (IF *Time2*<=12 THEN 0 ELSE 1) ELSE (IF *Time2*<=12 THEN 1 ELSE 0)
swich_Biennial_Reverse = IF *TIME* <= 335 THEN (IF *Time2*<=12 THEN 1 ELSE 0) ELSE (IF *Time2*<=12 THEN 0 ELSE 1)
Time2 = *TIME*-(*Biennial**24)
Production_and_Gross_Stocks:
Gross_Stock(*t*) = *Gross_Stock*(*t - dt*) + (*Delivery_Rate_to_Stock* - *Stock_Consumption_Rate_1* -
Stock_Consumption_Rate_2) * *dt*
INIT Gross_Stock = 5000000
INFLOWS:
Delivery_Rate_to_Stock = *DELAY*(*Coffee_Harvest_Rate*,*WIP_Delay*)
OUTFLOWS:
Stock_Consumption_Rate_1 = *Roaster_Acquisition_Rate*
Stock_Consumption_Rate_2 = *Holder_Acquisition_Rate*
Total_Expp(*t*) = *Total_Expp*(*t - dt*) + (*Expp_Rate*) * *dt*
INIT Total_Expp = 5000000
INFLOWS:
Expp_Rate = *Exportable_Production*
Total_Holders_and_Exports(*t*) = *Total_Holders_and_Exports*(*t - dt*) + (*Stock_Consumption_Rate_2*) * *dt*
INIT Total_Holders_and_Exports = 0
INFLOWS:
Stock_Consumption_Rate_2 = *Holder_Acquisition_Rate*
Total_Roaster_and_Domestic_Consumption(*t*) = *Total_Roaster_and_Domestic_Consumption*(*t - dt*) +
(*Stock_Consumption_Rate_1*) * *dt*
INIT Total_Roaster_and_Domestic_Consumption = 0
INFLOWS:
Stock_Consumption_Rate_1 = *Roaster_Acquisition_Rate*
Work_In_Progress(*t*) = *Work_In_Progress*(*t - dt*) + (*Coffee_Harvest_Rate* - *Delivery_Rate_to_Stock*) * *dt*
INIT Work_In_Progress = 0
INFLOWS:
Coffee_Harvest_Rate = *DELAY*(*Harvest_Function*,*Start_Harvest_Delay*)
OUTFLOWS:
Delivery_Rate_to_Stock = *DELAY*(*Coffee_Harvest_Rate*,*WIP_Delay*)
Years(*t*) = *Years*(*t - dt*) + (*Count12*) * *dt*
INIT Years = 0
INFLOWS:
Count12 = *PULSE*(1,12,12)
Annual_Expp = *Total_Expp*-*Total_Expp_Previous_Year*
Annual_Expp_in_December = *HISTORY*(*Annual_Expp*,12**Years*)
Annual_Production_Demand_Ratio = IF *TIME* <= 12 THEN 0 ELSE
Maximum_Annual_Production_Capacity/Total_Demand
Annual_Stock_Demand_Ratio = IF *TIME* <= 12 THEN 0 ELSE *GS_in_March/Total_Demand*
Annual_TDC = *Total_Roaster_and_Domestic_Consumption*-*TDC_Previous_Year*
Annual_TDC_in_December = *HISTORY*(*Annual_TDC*,12**Years*)
Annual_THE = *Total_Holders_and_Exports*-*THE_Previous_Year*
Annual_THE_in_December = *HISTORY*(*Annual_THE*,12**Years*)

Exportable_Production = Delivery_Rate_to_Stock-Stock_Consumption_Rate_1
Gross_Stock_Annual_Balance = Annual_Expp_in_December-Annual_THE_in_December
*GS_in_March = HISTORY(Gross_Stock,12*Years+3)*
Harvest_Function = (Maximum_Annual_Production_Capacity/1)(((1/SQRT(2*PI*1.237072*1.237072))*EXP(-(Time1-6.457648)^2/(2*1.237072^2))))*
*Maximum_Annual_Production_Capacity = HISTORY(.Production_Capacity_Total_for_Haverst,2+12*Years)*
Production_Cost_per_Bag = 200
Start_Harvest_Delay = 0
Stock_Cost_per_Bag = 10
Supply_DC_Ratio = Gross_Stock/Stock_Consumption_Rate_1
*TDC_Previous_Year = HISTORY(Total_Roaster_and_Domestic_Consumption,12*Years)*
*THE_Previous_Year = HISTORY(Total_Holders_and_Exports,12*Years)*
*Time1 = TIME-(Years*12)*
Total_Cost_per_Bag = Production_Cost_per_Bag+Stock_Cost_per_Bag
Total_Demand = Annual_TDC_in_December+Annual_THE_in_December
*Total_Expp_Previous_Year = HISTORY(Total_Expp,12*Years)*
WIP_Delay = 2
{ The model has 180 (180) variables (array expansion in parens).
In 4 Modules with 0 Sectors.
Stocks: 18 (18) Flows: 26 (26) Converters: 136 (136)
Constants: 26 (26) Equations: 136 (136) Graphicals: 1 (1) }