

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

ALEXANDRE J. FERREIRA E AMIT BHAYA

*Núcleo Avançado de Computação de Alto Desempenho – NACAD e Programa de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE-UFRJ*

Caixa Postal 68504, RJ 21945-970, BRASIL

E-mails: aleengaut@gmail.com, amit@nacad.ufrj.br

Abstract - The world coffee market is a complex system with dominant negative feedbacks and response delays, which generate oscillations with large amplitudes and low frequency. The Brazilian coffee supply chain faces new challenges, which could change the structure of production. 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 a mathematical and computational model for the dynamics of the Brazilian coffee production to investigate its behavior. Concepts of systems dynamics and statistics were applied to coffee market data and market analysis. As a computational tool, Stella Architect software and its features were employed to model the mathematical equations. The dynamic model developed is able to estimate tree stocks, productions, exports, and gross opening stocks of green coffee, among other variables. The dynamic model may be used to estimate market behavior for horizons longer than a crop year and different scenarios, serving governments, cooperatives and producers. Moreover, the model may also be applied as a risk management tool and be adapted to receive other functionalities and data.

Keywords - Coffee Market, Systems Dynamics, Supply Chain, Computational Model.

Resumo - O mercado mundial do café sugere ser um sistema dinâmico complexo com realimentações negativas e respostas em atraso, que geram oscilações com largas amplitudes e baixa frequência. A cadeia de suprimentos de café brasileiro passa por novos desafios que podem mudar a estrutura de produção. Os modelos dinâmicos propostos na literatura para o mercado do café não são práticos, não estão ajustados e não são realistas, embora estes sugiram que as oscilações são endógenas. Este trabalho propõe um modelo matemático e computacional para a dinâmica da produção de café brasileiro para investigar seu comportamento. Conceitos de sistemas dinâmicos e estatísticas foram aplicadas a dados da cadeia de suprimentos e a análises de mercado. O software *Stella Architect* e suas funcionalidades foram empregadas para modelar computacionalmente as equações matemáticas propostas. O modelo dinâmico desenvolvido é capaz de estimar os estoques de árvores, produção, exportação e estoques de passagem de sacas de café, entre outras variáveis. O modelo dinâmico é capaz de estimar comportamentos de mercado para horizontes superiores a um ano safra e diferentes cenários, auxiliando políticas públicas, cooperativas e produtores. Além disso, o modelo pode ser aplicado como ferramenta de gestão de riscos e ser adaptado para receber outras funcionalidades e dados.

Palavras-chave - Mercado do Café, Sistemas Dinâmicos, Cadeias de Suprimentos, Modelo Computacional.

1 Introdução e motivação

O mercado mundial do *commodity* do café sugere ser um sistema dinâmico com realimentações negativas dominantes, não-linearidades e variáveis em atraso, que geram oscilações com largas amplitudes e baixa frequência (Ferreira, 2017). 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.

Na Figura 1 podemos observar que os estoques mundiais se correlacionam negativamente com os preços, ou seja, ocorrem picos de estoques poucos anos após picos de preços. Por outro lado a produção cresce junto com a demanda. Os movimentos das demandas não sugerem ciclos e parecem ser inertes a todas as variações de mercado. A demanda sugere acompanhar o crescimento populacional no período analisado.

O objetivo deste artigo é propor um modelo matemático e computacional, condizente com os dados reais conhecidos, para a dinâmica da produção de café brasileiro a fim de investigar seu comportamento.

Segundo Laignelet (1976), as principais fontes de oscilações estão no setor de mercado futuro, onde atuam os especuladores de mercado. Entretanto, sua conclusão foi que o comportamento oscilatório, principalmente nos preços, tem origem interna e estrutural. A origem das oscilações está nas realimentações negativas dominantes com substanciais atrasos em algumas variáveis e nas estratégias de decisão falhas, que não são capazes de compreender o sistema como um todo.

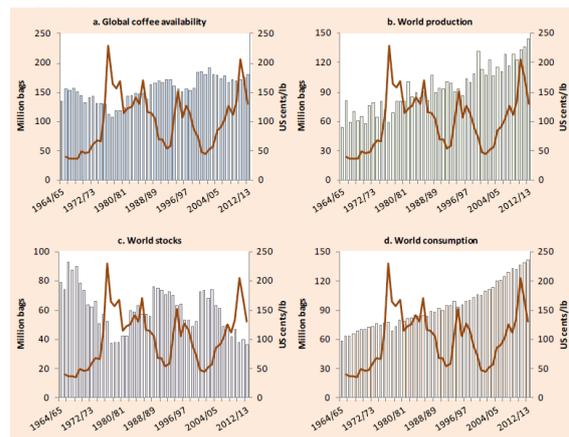


Figura 1 – Relação entre as principais variáveis do mercado do café e dos preços (curva contínua) (ICO Composite Price Indicator) entre 1964 e 2013. Fonte: ICO, 2014.

Pierson e Sterman (2013) argumentam que gestores são relutantes em aceitar estratégias para mitigar ciclos e isso traz consequências em detrimento aos mercados. Tal relutância é observada nos produtores e indústrias cafeeiras que não aceitam restrições e limitações. De fato, Laignelet (1976) propõe ajustes dos estoques de acordo com a média do consumo para controlar o sistema dinâmico. Por outro lado, produtores tomam decisões antecipativas e adaptativas de acordo com os preços, o que torna a implementação de estratégias de controles eficientes um grande desafio.

A Figura 2 mostra um diagrama de ciclo causal básico para o mercado do café mundial, baseado em dados do mercado e dos gráficos da Figura 1 (Ferreira, 2017). Este diagrama serve para orientar o desenvolvimento do modelo descrito neste artigo. Os principais modos de referência aparecem nos gráficos de estoques e preços e de produção e preços. Os ciclos B1 e B2 são os ciclos dominantes. Por exemplo, no ciclo B1, quanto mais estoques, temos menores preços, menos investimentos, menos árvores plantadas e menos produção que implicam em menos estoques novamente, dado a aplicação do consumo.

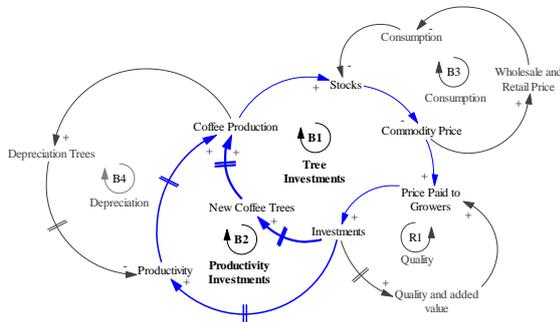


Figura 2 – Diagrama de ciclo causal do mercado do café mundial baseado na análise de gráficos e de outros dados do mercado. Fonte: Ferreira, 2017.

Para o mercado do café, é identificada a capacidade de produção como correspondente às lavouras. A iniciação da capacidade é dada pela taxa de plantio e regeneração de lavouras. A capacidade perdida é dada pela taxa de eliminação de plantas. A linha de suprimento possui uma fase de beneficiamento, onde a taxa de início de produção corresponde a taxa de colheita. A taxa de produção é aproximada pela taxa de entrega de sacas nos armazéns. A capacidade de utilização é sempre de 100%. A linha de suprimento adiciona janelas de atrasos na estrutura de gerenciamento de estoques. A taxa de consumo é descrita pela soma dos consumos domésticos e pelas taxas de exportação. Os estoques brutos de sacas e estoques de cobertura, que são função das taxas de produção 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 a produção. A seção 2 contém mais detalhes do mercado.

Políticas e estratégias implementadas no passado, que visavam evitar oscilações e garantir estabilidade de preços, não surtiram os efeitos desejados. O mercado mundial do café tem enfrentado desafios antigos e novos, tais como alterações climáticas mais severas

e falta de gerência de riscos devido à grande volatilidade de preços (ICO, 2014). Existem profundas mudanças estruturais ocorridas nos últimos anos e seus efeitos não são perfeitamente conhecidos (Ferreira, 2017).

Os modelos dinâmicos criados anteriormente, como Laignelet (1976), Osorio (2009) e Velasquez (2010), não tiveram uma aplicação prática, não foram ajustados e serviram apenas como fontes de informação qualitativa no trabalho de Ferreira (2017), no qual o presente artigo se baseia. Neste contexto, este trabalho propõe um modelo dinâmico para a cadeia de suprimentos do mercado do café brasileiro, analisando as ações dos preços e alterações climáticas na cadeia e efetuando um ajuste para o cenário nacional atual.

2 Modelo Quantitativo

O modelo quantitativo desenvolvido neste artigo descreve os pontos mais críticos do sistema, tais como: os efeitos dos preços e investimentos, os efeitos dos estoques de árvores produtivas e em formação, os efeitos das mudanças climáticas na produção e na capacidade de produção e os efeitos das possíveis estratégias de torrefadoras e exportadores nos últimos anos. Além disso, relações não-lineares e variantes no tempo entre importantes variáveis são implementados no modelo, tais como saturações que delimitam taxas mínimas e máximas e níveis de estoques de cobertura que diminuem com o tempo.

2.1 Capacidade de produção – estoques de árvores

Conforme laço B1, a equação 1 descreve a função de Taxa de Plantio de Árvores, TPA, em relação ao Preço Pago aos Produtores, PPP (variável exógena).

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

O parâmetro a_1 define o ponto de saturação superior da função, que foi estimado em 120 milhões de árvores/mês. O preço de referência, ppp_{ref_1} , é o ponto de inflexão da função, onde temos o valor médio das ordenadas. 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.

As equações 2 e 3 descrevem a variação do Estoque de Árvores em fase de Crescimento, EAC. TARAC descreve a Taxa de Árvores Replantadas devido, principalmente, à prejuízos causados por Alterações Climáticas. Esta taxa é uma variável exógena, que descreve um distúrbio no sistema. TAM é a Taxa de Árvores que Maturam considerado o tempo de atraso de maturação, T_1 (Laignelet, 1976).

$$\frac{dEAC}{dt} = TPA + TARAC - TAM \quad (2)$$

$$TAM = \text{MAX}(0, TPA(t - T_1)) \quad (3)$$

As equações 4 e 5 descrevem a variação dos Estoques de Árvores com Produtividade Crescente, EAPC. TAPD descreve a Taxa de saída das Árvores que possuem Produtividade em Declínio, considerado o tempo de atraso para entrar em baixa produtividade, T_2 . TAPAC₁ é a Taxa de saída de Árvores Perdidas devido à Alterações Climáticas severas. Esta última taxa é um distúrbio exógeno do sistema.

$$\frac{dEAPC}{dt} = TAM - TAPD - TAPAC_1 \quad (4)$$

$$TAPD = MAX(0, TAM(t - T_2)) \quad (5)$$

As equações 6, 7 e 8 descrevem a variação dos Estoques de Árvores com Produtividade em Declínio, EAPD. A taxa TAR é a Taxa de Árvores Regeneradas que descreve a Taxa de Recuperação de Árvores consideradas Não-Produtivas TRANP, considerado o tempo de atraso T_4 para regeneração. TANP é Taxa de Árvores que passam a ser Não-Produtivas, considerado o tempo de atraso T_3 .

$$\frac{dEAPD}{dt} = TAPD + TAR - TANP - TAPAC_2 \quad (6)$$

$$TANP = MAX(0, TAPD(t - T_3)) \quad (7)$$

$$TAR = MAX(0, TRANP(t - T_4)) \quad (8)$$

A taxa TAPAC₂ segue as mesmas considerações feitas para TAPAC₁. 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.

A equação 9 descreve a variação dos Estoques de Árvores em processo de Regeneração, EAR. TRAAC é a Taxa de Árvores Recuperadas devido às Alterações Climática e, assim como a taxa TARAC, é uma variável exógena. Estas taxas de recuperação apresentam um tempo de atraso em relação a época das eliminações e precisa ser analisada caso a caso.

$$\frac{dEAR}{dt} = TRANP + TRAAC - TAR \quad (9)$$

A equação 10 descreve a taxa TRANP. Esta taxa é função da atratividade dos preços pagos aos produtores. A função pondera a recuperação que, 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 são recuperadas.

$$TRANP = MAX\left(0, \frac{EANP}{1 + e^{-k_2 * (PPP - PPP_{ref2})}}\right) \quad (10)$$

A equação 11 descreve a variação dos Estoques de Árvores Não-Produtivas, EANP. TDANP é a Taxa de Descarte de Árvores Não-Produtivas que tem a ação contrária à de recuperação das árvores sendo, portanto, descrita pelo complemento do fator de recuperação descrito na equação 10. Entre as principais motivações para o descarte de árvores estão os preços baixos pagos.

$$\frac{dEANP}{dt} = TANP - TRANP - TDANP \quad (11)$$

$$TDANP = MAX\left(0, EANP * \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-k_2 * (PPP - PPP_{ref2})}}\right)\right) \quad (12)$$

As equações 13 e 14 descrevem os Estoques de Árvores em Formação, EAF, e os Estoques de Árvores em Produção, EAP, respectivamente.

$$EAF = EAC + EAR \quad (13)$$

$$EAP = EAPC + EAPD \quad (14)$$

2.2 Capacidade de produção – produtividade

Conforme laço B2, as produtividades das árvores são modeladas. Os estoques EAPC possuem Produtividade Média, PMAPC, de 0,010880 sacas/árvore/ano. Os estoques EAPD possuem Produtividade Média, PMAPD, de 0,008929 sacas/árvore/ano. Estes dois grupos de estoques correspondem a mais de 90% da capacidade de produção de café.

Os principais fatores capazes de alterar estas produtividades médias são: os Efeitos das Alterações Climáticas nas Produtividades, EFACP, e os Efeitos de Cuidados Aplicados às lavouras pelos agricultores, EFCAL. Os efeitos 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.

A equação 15 mostra a função adotada para o efeito EFCAL. Como descrito por Laignelet (1976), a produtividade das árvores com os devidos cuidados pode chegar ao dobro das demais. Este dado implica em uma variação de 33% em torno das médias de produtividade das árvores. Além disso, dependendo da faixa de preços aplicada e do parâmetro k_3 ($k_3 > 0$), pode-se ter vários cenários de produtividade.

$$EFCAL = MAX\left(0, \frac{0,66}{1 + e^{-k_3 * (PPP - PPP_{ref3})}} - 0,33\right) \quad (15)$$

A equação 16 mostra a função adotada para a Produtividade das Árvores com Produtividade Crescente, PAPC, e a equação 17 mostra a função adotada para a Produtividade das Árvores com Produtividade em Declínio, PAPD. O atraso T_5 é o atraso de tempo para ser ajustada a produtividade das árvores.

$$PAPC = PMAPC * (1 + EFACP) * (1 + EFCAL(t - T_5)) \quad (16)$$

$$PAPD = PMAPD * (1 + EFACP) * (1 + EFCAL(t - T_5)) \quad (17)$$

As equações 18 e 19 descrevem a Capacidade de Produção do estoque EAPC e EAPD, respectivamente.

$$CPAPC = EAPC * PAPC \quad (18)$$

$$CPAPD = EAPD * PAPD \quad (19)$$

O café é uma cultura bianual, portanto, após um ano de safra expressiva, as lavouras sofrem um desgaste natural que causa uma quebra na próxima safra.

Esta quebra, que é representada pelo fator f_q , varia entre 10% e 30% da produção total. Usualmente são observadas quebras de 20%. Este fator também sofre efeitos das alterações climáticas, sendo amenizado uma vez que as alterações climáticas atuam no sentido de baixar a produtividade.

Finalmente, as equações 20, 21 e 22 descrevem a Capacidade de Produção Total de café verde, CPT.

$$CPT = (1 - SW * f_q)(CPAPC + CPAPD) \quad (20)$$

$$SW = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq 12, \\ 0, & 12 < t \leq 24; \end{cases} \quad t \text{ em meses}; \quad (21)$$

$$SW(t + 24) = SW(t) \quad (22)$$

A Taxa de Colheita de café, TCOL, esperada ao longo do ano safra, é descrita pelas equações 23 e 24 abaixo.

$$TCOL = CPT * \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{col}^2}} e^{-\frac{((t-n*12)-u_{tcol})^2}{2\sigma_{col}^2}} \right), \begin{cases} n = 0,1, \dots \text{anos} \\ t > 0 \\ \sigma_{col} > 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$CPT = CPT * \delta((t - n * 12) - 3) \quad (24)$$

A capacidade de produção começa a ser formada, em geral, a partir de setembro de cada ano e a colheita começa normalmente em meados de março e abril. Assim, a função da equação 23 define as porcentagens mensais colhidas do total da capacidade anual. Os dados σ_{col} e u_{tcol} foram calculados a partir de estatísticas das colheitas (Ferreira, 2017).

2.3 Trabalho em progresso e formação de estoques

Conforme proposto por Sterman (2009), é gerado o modelo de trabalho em progresso para o beneficiamento do café, onde as equações 25 e 26 descrevem as quantidades de café que estão em Beneficiamento pelos produtores, BEN. TRC é a Taxa de Recebimento de Café pelos armazéns que foi idealizada a partir dos registros de recebimentos das cooperativas de produtores. O parâmetro T_6 representa o tempo de atraso de 2 meses correspondente a fase de beneficiamento.

$$\frac{dBEN}{dt} = TCOL - TRC \quad (25)$$

$$TRC = \text{MAX}(0, TCOL(t - T_6)) \quad (26)$$

Conforme os estudos realizados, a equação 27 descreve a variação dos Estoques Brutos de café, EB.

$$\frac{dEB}{dt} = TRC - TATOR - TAEXP \quad (27)$$

2.4 Demandas de café – torrefadoras

A Taxa de Aquisição de café dos Torrefadores, TATOR, é função do Consumo Doméstico Estimado, CODEST, variável exógena, e dos Estoques dos Torrefadores, ETO. As equações 28 a 30 descrevem a dinâmica proposta para a variação dos estoques ETO.

O principal mecanismo de gestão dos gestores é a proporcão dos níveis de estoques de cobertura, *netor*.

Este parâmetro deve visar atender o Consumo Doméstico, COD, por um tempo definido presumindo uma eventual falta de produtos. Segundo a literatura, as proporções diminuem gradativamente e de forma linear ao longo dos anos (Ferreira, 2017). Este fenômeno pode ser explicado por meio dos avanços em logística e gerencia de cadeias de suprimentos ocorrido ao longo do período. ETOD significa Estoques Desejados. *taetor* é o tempo de ajuste para corrigir os desvios dos estoques.

$$\frac{dETO}{dt} = TATOR - COD \quad (28)$$

$$ETOD = \text{netor}(t) * COD \quad (29)$$

$$TATOR = \text{MAX}\left(0, \text{CODEST} + \frac{ETOD - ETO}{\text{taetor}}\right) \quad (30)$$

Eventualmente, esta taxa CODEST pode ser definida igual a COD. Além disso, para a taxa COD são adotadas curvas exponenciais de crescimento, pois o consumo tende a ter uma dinâmica muito lenta e crescente.

2.5 Demandas de café – exportadoras

A Taxa de Aquisição dos Exportadores, TAEXP, é função das Taxas de Demandas de Exportação Estimadas, TDEXPEST, variável exógena, e dos Estoques dos Exportadores, EEXP. O parâmetro *taexp* é tempo de ajuste para corrigir os desvios dos estoques. As equações de 31 a 33 descrevem a variação dos estoques EEXP.

$$\frac{dEEXP}{dt} = TAEXP - TDEXP \quad (31)$$

$$EEXPD = \text{neexp}(t) * TDEXP \quad (32)$$

$$TAEXP = \text{MAX}\left(0, TDEXPEST + \frac{EEXPD - EEXP}{\text{taexp}}\right) \quad (33)$$

As proporções dos níveis de estoques de cobertura dos exportadores *neexp* são definidas com o objetivo de cobrir consumos, assim como *netoc*. Eventualmente, a taxa TDEXPEST pode ser definida igual a Taxa de Demanda de Exportação, TDEXP.

As demandas de mercado das exportadoras são diferenciadas das demandas das torrefadoras. A taxa TDEXP é função das seguintes variáveis: Tendência de Taxa de Demanda de café Internacional, TTDINT, Preços Físicos do café, PFIS, e da Taxa de Produção Exportável, TPEXP. A taxa TDEXP pode ser observada nas equações 34 a 38.

$$TDEXP = TTDINT + Q + R \quad (34)$$

$$TTDINT = \text{EXPIN} * e^{\frac{1}{T_{cexp}} * t} \quad (35)$$

$$Q = \frac{a_2}{1 + e^{k_4 * (PFIS(t - T_7) - PFIS_{ref})}} - b_1 \quad (36)$$

$$R = \text{efpexp} * TPEXP(t - T_8) \quad (37)$$

$$TPEXP = TRC - TATOR \quad (38)$$

A taxa TTDINT é fundamentada a partir das taxas de consumo nos países importadores e consumidores.

Sua estimação é calculada como sendo a tendência exponencial de exportação de cafés do Brasil. A equação 35 descreve a taxa TTDINT, onde EXPIN é a Taxa Inicial e τ_{cexp} é a constante de tempo de crescimento.

A equação 36 representa a influência dos preços nas demandas de exportação. O sinal do parâmetro k_4 ($k_4 > 0$) mostra que mais exportação é impulsionada por preços mais baixos que a referência adotada. Neste caso, é esperado que haja um atraso de resposta T_7 em relação aos preços. Os parâmetros a_2 e b_1 são a saturação superior e inferior, respectivamente. O parâmetro $pfis_{ref}$ significa preços físicos de referência.

A taxa TPEXP vista na equação 38, é uma variável que mede as quantidades de café excedentes ou em escassez. Os Efeitos da taxa TPEXP, $efpexp$, nas demandas de exportação são considerados constantes, além de haver um atraso esperado T_8 . O atraso é motivado pelo fato de haver um abastecimento interno primeiro e as exportações de eventuais excedentes depois.

2.6 Limitações e fatores não modelados

Quanto aos parâmetros $netoc$ e $neexp$, gestores usualmente consideram a influência dos preços em sua definição. Os exportadores e torrefadores tendem a adquirir mais ou menos produtos para aumentar ou diminuir seus estoques de cobertura em antecipação à expectativa de flutuações de preços. Esta é uma estratégia de proteção contra alterações de preços. Este fenômeno não foi modelado.

As estruturas de produção estão passando por novas alterações e o modelo necessitaria ser reavaliado. Ainda assim, prevê-se um custo pequeno para esta reavaliação, dados os potenciais benefícios. Neste trabalho também não foram modeladas as relações de mercado que levam as formações de preços devido à complexidade inerente dos mercados futuros.

3 Ajuste paramétrico do modelo quantitativo e simulações

O primeiro objetivo é ajustar os parâmetros do modelo de linha de suprimento para entender os comportamentos dos mecanismos de produção, estoques e demandas com dados entre 1960 e 2015. Para investigar o modelo após ajustes, são propostas análises de cenários específicos com dados entre 2017 e 2018, considerando as estimativas de preços fundamentadas nos cenários de queda constante (Ferreira, 2017). Os dados são fornecidos publicamente por mais de uma fonte, como referenciado nos agradecimentos deste artigo.

3.1 Ajuste paramétrico do modelo com dados históricos (1960-2015)

O período considerado para efeitos de ajuste de dados é de 55 anos e a frequência dos dados é mensal. Os principais parâmetros, num contexto geral, foram

ajustados diferenciando os períodos com e sem intervenções governamentais (Ferreira, 2017). Mais ainda, os parâmetros foram ajustados considerando também a influência dos efeitos climáticos (entrada exógena).

Outra informação importante é que não há dados dos estoques de árvores anteriores a 1965. Isso significa que, para os primeiros 40 anos simulados, não estão disponíveis os dados de cada estoque de árvores. As plantas possuem um tempo de vida que varia entre 30 e 40 anos em média.

Para efetuar o ajuste do modelo, 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). O modelo foi dividido em submodelos para a estimação parcial dos parâmetros.

Como o ajuste envolve um processo de otimização, os parâmetros do modelo foram estimados tendo como critério a minimização da raiz da soma dos quadrados dos erros entre as saídas do modelo e cada uma das séries temporais históricas dadas, normalizadas pela média dos erros (RMSE/ μ) (Pierson e Serman, 2013).

Para cada variável objeto de ajuste, foi empregado o seguinte procedimento:

- Definir valores iniciais dos parâmetros do modelo com base nos dados históricos e uso de métodos numéricos que maximizam verossimilhança como GRG - *Generalized Reduced Gradient*;
- Configurar o solver do *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*).
- Exportar resultados do *Stella* para o *MS-Excel* para cálculo de erros, correlações e parâmetros de Thiel;
- Verificar se o erro RMSE/ μ admissível é satisfeito, caso contrário retornar as análises com atualização dos parâmetros até atingir convergência.

Os valores estimados para os parâmetros de ajuste podem ser observados na Tabela 1. A coluna intervalos de ajuste contem limites propostos a partir dos estudos e análises do mercado. Alguns limites não puderam ser sugeridos pelos estudos. Os valores estimados encontram-se dentro dos intervalos propostos.

Os gráficos observados na Figura 3 mostram os resultados atingidos (saídas do modelo) para as principais séries temporais confrontados com os dados históricos. A Tabela 2 mostra os erros e correlações estatísticas calculados entre as saídas do modelo e dados históricos.

Tabela 1. Valores estimados para os parâmetros do modelo proposto com dados históricos entre 1960 e 2105.

Parâmetros de ajuste	Equação	Valores Estimados	Intervalos de ajuste	Unidades
Limite superior para taxa de plantio (a_1)	1	40	[0 120]	Milhões árvores/mês
Limite superior para taxa de demanda de exportação (a_2)	36	0,9	-	milhões de sacas/mês
Limite inferior para taxa de demanda de exportação (b_1)	36	0,55	-	milhões de sacas/mês
Declividade para taxa de plantio (k_1)	1	0,02	$[-\infty +\infty]$	-
Declividade para taxa de descarte de árvores não-produtivas (k_2)	10 e 12	0,02	$[-\infty +\infty]$	-
Declividade para efeitos de cuidados aplicados às lavouras (k_3)	15	0,04	$[-\infty +\infty]$	-
Declividade para taxa de demanda de exportação (k_4)	36	0,005	$[-\infty +\infty]$	-
Preço de referência para taxa de plantio (ppp_{ref1})	1	105	[38 190]	USCents/lb
Preço de referência para taxa de descarte de árvores não-produtivas (ppp_{ref2})	10 e 12	105	[30 190]	USCents/lb
Preço de referência para efeitos de cuidados aplicados às lavouras (ppp_{ref3})	15	82	[30 190]	USCents/lb
Preço de referência para taxa de demanda de exportação ($pfts_{ref}$)	36	90	[38 290]	USCents/lb
Tempo de atraso de maturação (T_1)	3	42	[0 48]	meses
Tempo de atraso para entrar em baixa produtividade (T_2)	5	119	[0 120]	meses
Tempo de atraso para árvores passar a ser não-produtivas (T_3)	7	239	[0 312]	meses
Tempo de atraso para regeneração de árvores (T_4)	8	41	[0 60]	meses
Tempo de atraso para ser ajustada a produtividade das árvores (T_5)	16 e 17	36	[12 48]	meses
Tempo de atraso em fase de beneficiamento (T_6)	26	2	[1 4]	meses
Tempo de atraso para ação de preços físicos na demanda de exportação (T_7)	36	2	-	meses
Tempo de atraso para ação das produções exportáveis (T_8)	37	12	-	meses
Tempo de ajuste para corrigir desvios dos estoques das torrefadoras (tae_{tor})	30	3	[0 12]	meses
Tempo de ajuste para corrigir desvios dos estoques das exportadoras (tae_{exp})	33	3	[0 12]	meses
Fator de quebra de safra bianual (f_q)	20	0,2	[0,1 0,3]	-
Proporção dos níveis de estoques de cobertura das torrefadoras ($netor$)	29	2	[0 6]	-
Proporção dos níveis de estoques de cobertura das exportadoras ($neexp$)	32	6	[0 12]	-
Efeito da produção exportável nas demandas de exportação (efp_{exp})	37	0,075	-	-

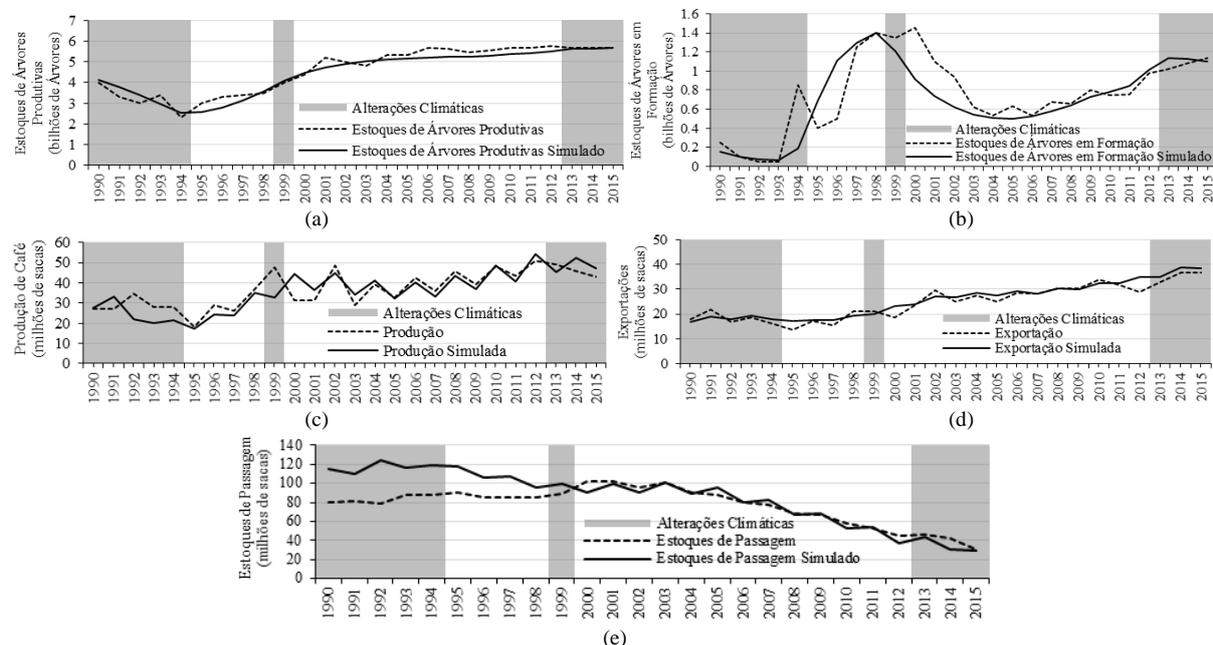


Figura 3. Resultados de simulações de ajuste paramétrico comparados com dados históricos.

Tabela 2. Resultados da comparação entre variáveis simuladas e dados históricos 1960 – 2015.

Variáveis	MAE/ μ	RMSE/ μ	MAPE	U ^m	U ^s	U ^c	R ²	r
	1/ano	1/ano	%	adimensional				
Estoques de árvores produtivas	0,0555	0,0049	6,25	0,08	0,04	0,88	0,96	0,98
Estoques de árvores em formação	0,1942	0,0953	23,05	0,03	0,00	0,97	0,66	0,81
Produção de café	0,1712	0,0504	20,04	0,03	0,01	0,96	0,68	0,83
Exportação de café	0,0663	0,0078	7,67	0,17	0,01	0,82	0,92	0,96
Estoques de passagem	0,1844	0,0641	15,74	0,24	0,22	0,54	0,77	0,88

MAE/ μ significa Erro Médio Absoluto dividido pela média dos dados. RMSE/ μ significa Erro Médio da Raiz dos Quadrados dividido pela média dos dados. MAPE significa Erro Médio Absoluto Percentual. U^m, U^s e U^c são os parâmetros de desigualdade de Theil, onde o Erro Quadrático Médio - MSE é fracionado em desigualdade de médias, desigualdade de variâncias e desigualdade de covariâncias respectivamente (Sterman, 2009). R² significa coeficiente de determinação. r significa coeficiente de correlação.

Conforme Figura 3a, as dinâmicas das lavouras plantadas por volta de 1965-1975 começam a chegar nos estoques de árvores improdutivas por volta de 2005. Após 2005, começa a surgir recuperação destas lavouras. Observa-se a formação de estoques de árvores produtivas mais fortemente entre 2000 e 2015, totalizando 5 bilhões de plantas. Também são observadas as ações das alterações climáticas que agem no sentido de diminuir a capacidade de produção entre 1990 e 1994, principalmente. A minimização do erro RMSE atingiu o menor valor entre as saídas, ficando em 0,0049. Os preços de referência ficaram com média de 98 USCent/lb no período todo, mas as declividades variaram entre 0,2 e 0,02.

As alterações climáticas entre 2013 a 2015, que representam secas, são apresentadas como justificativas para estagnação de estoques de árvores e produtividades. No entanto, não existem estatísticas das perdas de árvores neste período.

A Figura 3b mostra os comportamentos das lavouras em formação. Do ponto de vista dos dados históricos, por volta de 1994, ocorrem geadas que causam variações mais bruscas nas formações. São observadas dificuldades de ajustes por volta de 1994 e 2000. O erro MAPE é mais expressivo chegando a 23%. Entretanto, o modelo ajustou melhor após 2003. Apesar das dificuldades em ajustar os estoques em formação, os estoques de árvores produtivas apresentam bom ajuste aos dados históricos, conforme Figura 3a.

Os principais pontos de dificuldade de ajuste de produção se despontam próximos dos efeitos das alterações climáticas, conforme Figura 3c. Foi observado que entre 1999 e 2001 as bianualidades de produção se inverteram. Os preços de referência para a produtividade ficaram em 100 USCent/lb antes de 1994 e 82 USCent/lb após 1994. O fator de bianualidade empregado foi de 25% antes de 1994 e 20% após 1994. Os resultados dos erros são medianos comparados com as outras saídas.

Porção da dinâmica sobre as exportações vem das taxas de produção exportável que, por sua vez, são função das produções. Nas exportações aparecem as oscilações de baixa amplitude e alta frequência (reflexo da bianualidade), conforme Figura 3d. Mais ainda, somando os efeitos da produção exportável e do preço físico, retratam-se as baixas relativas ao crescimento exponencial nas exportações em meado de 1995 e 2012, e as altas relativas em meados de 1991 e 2002. O modelo não foi capaz de estimar as baixas de 2012.

O efeito da produção exportável *efpexp* ficou em 7,5% ao mês no período todo. Isso implica em exportação de 90% dos excedentes no ano. A proporção dos níveis de estoques de cobertura para torrefadoras e exportadores terminaram 2015 variando entre 2 e 6 (estoques para 2 a 6 meses sem aquisições). Como as produções diminuem muito em setembro-outubro e aumentam em março-abril, tem-se um período de aproximadamente 6 meses sem colheitas. Os valores de cobertura estão dentro da faixa de entressafras.

Os estoques de passagem não possuem divulgação confiável e total dos dados. A partir dos estudos do mercado, estima-se que os estoques reais são maiores que os publicados. Por meio do cálculo dos balanços entre produção e consumo, foi proposto um nível de estoque em 1990 de modo a atingir o anunciado em 2015, cujo valor é de 15 milhões de sacas. A quantidade não publicada foi calculada em aproximadamente 80 milhões de sacas no período. A princípio, as discrepâncias entre as saídas do modelo e dados históricos até 2000 são devido aos dados faltantes, conforme Figura 3e. Após 2000, as curvas apresentam bom ajuste. Em termos de erros, os estoques de passagem apresentam valores expressivos.

Sobre a influência das alterações climáticas, como entre 1990 e 1994, estas podem motivar movimentos de estoques para gerar capital aos produtores. Também existem implicações de níveis de estoques baixos como entre 2013 e 2015. Contudo, existem controvérsias sobre os efeitos de estoques baixos na teoria de gerenciamento de estoques. Estes efeitos não foram modelados.

3.2 Simulação de estimação entre 2016 e 2018

3.2 Simulação de estimação entre 2016 e 2018

Tomando o modelo ajustado com os dados históricos até 2015, este conjunto de análises busca avaliar a cadeia de produção para os seguintes cenários: não ocorrem alterações climáticas entre 2013 e 2015 e ocorrem as alterações climáticas significativas (secas intensas) neste período. Segundo estudos, os es-

toques de árvores produtivas estagnaram e foi proposto uma taxa de 15 % de quebra nas produtividades médias das árvores. Os estoques de árvores giram em torno de 5,8 bilhões de plantas produtivas.

A Figura 4 mostra os resultados encontrados para a produção no período. O modelo aponta que em 2016 teríamos recorde de produção em mais de 65 milhões de sacas se não ocorressem secas. Com secas, a produção fica em 53 milhões de sacas. Segundo levantamento da Conab, o Brasil produziu 51 milhões naquele ano e, segundo ICO, produzimos 55 milhões. As simulações com saídas sem alterações climáticas demonstram uma aplicação do modelo proposto.

A apresentação dos dados históricos estimados e medidos pela Conab e ICO servem de comparação para ilustrar dificuldades em estimar taxas. As taxas calculadas pelo modelo permanecem entre as previsões das principais instituições do setor. A Conab estima que a safra de 2018 deve ter uma produção entre 54 e 58 milhões. Considerando as secas, a produção calculada pelo modelo para 2018 é mais otimista e aponta 61 milhões.

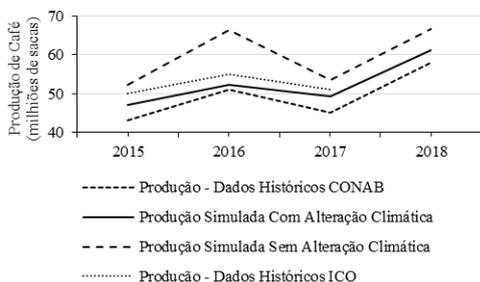


Figura 4. Resultados para as taxas de produção do café para as análises sem/com efeitos das secas de 2013-2015.

4 Conclusão

Foi desenvolvido um modelo matemático computacional da cadeia de suprimentos do café capaz de estimar os efeitos dos preços praticados e das alterações climáticas nas suas principais variáveis, tais como produção, estoques de café e estoques de árvores.

Em geral, as saídas do modelo apresentam bom ajuste aos dados históricos. Como visto, as alterações climáticas são diversas e afetam em diferentes características das lavouras e das produtividades. Do ponto de vista de dinâmica, trata-se de um distúrbio que desafia tomadas de decisão.

Simulações focadas em avaliar as alterações climáticas entre 2013 e 2015, alimentado com os dados de preços até 2018, estimou que uma produção de 61 milhões de sacas será atingida em 2018 (Ferreira, 2017). Portanto, quando comparado com dados da Conab, a estimativa do modelo proposto apresentou um desvio aceitável entre 2 e 6 milhões de sacas.

As dinâmicas propostas, que envolvem realimentação negativa com significativos atrasos em variáveis do sistema, mostram-se bem modeladas

quando observamos os resultados mostrados na Tabela 1, Tabela 2 e gráficos. O modelo também se mostrou mais específico do que os modelos encontrados na literatura (Laignelet, 1976 e Velasquez, 2010) tanto nos aspectos dinâmicos quanto computacionais.

Como trabalhos futuros são indicados o estudo da aplicação de métodos como estimação bayesiana e filtro de kalman para ajuste paramétrico.

O modelo proposto representa uma parte significativa da cadeia de suprimentos do *commodity* do café dentro do contexto do agronegócio brasileiro, servindo como simulador de cenários para a compreensão da dinâmica das cadeias, para a gestão de valores em cadeias produtivas e para a gestão de riscos, tais como alterações climáticas e flutuações de preços.

Agradecimentos

Agradecemos as instituições que disponibilizam dados do mercado do café, tais como Confederação Nacional do Café - CNC, Companhia Nacional de Abastecimento - Conab e *International Coffee Organization* - ICO. Agradecemos também aos revisores.

Referências Bibliográficas

- FERREIRA, A. J., "Modelo Computacional Da Dinâmica Da Cadeia De Suprimentos Do Mercado Do Café Brasileiro", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Brasil, 2017.
- 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.
- LAIGNELET, R. S., "World Coffee Dynamics", In: School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, USA, April 1976.
- 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, 2009.
- PIERSON, K., STERMAN, J.D., "Cyclical Dynamics of Airline Industry Earnings". In: System Dynamics Review. v. 29, pp. 129–156, 2013.
- STERMAN, J.D., *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. . Nachdr. Boston, Irwin/McGraw-Hill, 2009.
- 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.