Viabilidade Econômica da Cafeicultura sob Incerteza: Simulação de Monte Carlo Aplicada a Sistemas Produtivos no Brasil

Coffee Production Viability under Uncertainty: A Monte Carlo Simulation Approach across Brazilian Production Systems

Abner Matheus João
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo (Esalq/USP). Piracicaba, SP, Brasil
Thiago Guilherme Péra
Esalq/USP. Piracicaba, SP, Brasil
Lucilio Rogerio Aparecido Alves
Esalq/USP. Piracicaba, SP, Brasil

GT 02 - Governança e gestão do agronegócio

Resumo: Este estudo avalia a viabilidade econômica do investimento em cafeicultura sob incerteza, com foco em três sistemas produtivos representativos: o café conilon nos municípios de Pinheiros (ES) e Itabela (BA) e o café arábica em Patrocínio (MG). Para capturar a variabilidade intrínseca das condições produtivas e de mercado, simulou-se um modelo estocástico composto pela Receita Líquida Operacional anual e pelo fluxo de caixa do investimento, descontado ao longo de um horizonte de 20 anos. As variáveis-chave de custo e produtividade foram tratadas como aleatórias, com base em dados oficiais e em parâmetros ajustados à realidade regional. Os resultados demonstram diferenças marcantes entre regiões e sistemas: Itabela apresenta maior probabilidade de retorno positivo; Patrocínio situa-se na faixa intermediária; e Pinheiros revela elevada exposição ao risco, com maior incidência de perdas econômicas. Conclui-se que fatores como o custo de formação do cafezal, o preço médio do café e a taxa mínima de atratividade exercem influência determinante sobre o Valor Presente Líquido do investimento. De modo transversal, o estudo evidencia a relevância de ferramentas probabilísticas na análise de culturas permanentes, mostrando que decisões de investimento devem considerar a distribuição de resultados, a variância e a probabilidade de prejuízo, e não apenas indicadores determinísticos.
Palavras-chave: cafeicultura, simulação estocástica, risco produtivo, viabilidade econômica.

Abstract: This study assesses the economic feasibility of coffee investments under uncertainty, focusing on three representative production systems: robusta (conilon) coffee in Pinheiros (ES) and Itabela (BA), and arabica coffee in Patrocínio (MG). To capture the inherent variability in production and market conditions, a stochastic model was developed that incorporates annual net operating income and discounted cash flows over a 20-year horizon. Key cost and productivity variables were modeled as stochastic inputs, based on official data and parameterized to reflect regional production conditions. The results reveal substantial disparities across systems: Itabela shows the highest likelihood of positive economic returns, Patrocínio occupies an intermediate position, and Pinheiros exhibits greater downside risk, with a higher probability of negative outcomes. The findings indicate that plantation establishment costs, average coffee prices, and the discount rate are the primary drivers of net present value (NPV). More broadly, the study highlights the relevance of probabilistic approaches in evaluating perennial agricultural systems, demonstrating that investment decisions should account for outcome distributions, variability, and downside risk, rather than relying solely on deterministic point estimates.
Keywords: coffee farming, stochastic simulation, production risk, economic feasibility.

1. Introdução

A avaliação econômica de culturas permanentes, como a cafeicultura, é amplamente estudada em virtude da elevada imobilização de capital, dos longos ciclos de retorno e da elevada vulnerabilidade a riscos de natureza agronômica, climática e mercadológica. Em um contexto recente de expansão da produção para novas fronteiras agrícolas, maior adoção de tecnologias, como a irrigação, e crescente exposição à volatilidade de preços, as decisões de investimento tornam-se cada vez mais complexas e dependentes de análises robustas.

No Brasil, a relevância da cafeicultura é evidenciada tanto pela sua contribuição econômica quanto pela sua distribuição geográfica. De acordo com dados do IBGE (2024), os principais estados produtores são Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Bahia, que também concentram a maior área cultivada. Observa-se, contudo, heterogeneidade na composição produtiva, com predominância de café arábica em Minas Gerais e maior participação do conilon no Espírito Santo. Adicionalmente, mudanças recentes no mercado indicam transformações relevantes na dinâmica produtiva: enquanto a produção de *Coffea arabica* apresentou retração associada a condições climáticas adversas, a produção de *Coffea canephora* (conilon/robusta) vem crescendo, impulsionada pela maior adoção de irrigação e por condições climáticas mais favoráveis (USDA, 2025).

Do ponto de vista econômico, os preços das principais variedades também apresentaram elevações significativas entre 2019 e 2024, com crescimento de 113% no café arábica e de 173% no conilon (CEPEA, 2025). Esse movimento, aliado ao aumento da área cultivada, reforça o interesse em novos investimentos no setor. Entretanto, a ausência de correlação direta entre a expansão de área e o aumento da produção, conforme evidenciado por dados da CONAB (2025), indica elevada variabilidade produtiva, reforçando a importância da incorporação de incertezas na análise econômica.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é estimar a viabilidade econômica do investimento em cafeicultura sob incerteza, por meio de simulações de Monte Carlo aplicadas a diferentes regiões produtoras e a diferentes sistemas tecnológicos. Busca-se mapear a distribuição probabilística dos retornos, mensurar a probabilidade de sucesso econômico e identificar os principais direcionadores de risco, oferecendo subsídios para decisões estratégicas de investimento e de gestão no setor cafeeiro.

A relevância deste estudo decorre do fato de que decisões de investimento em cafeicultura ainda se baseiam, em grande medida, em abordagens determinísticas, que não capturam adequadamente a distribuição de riscos. Assim, compreender como as incertezas relacionadas à produtividade, aos preços e aos custos interagem ao longo do tempo torna-se fundamental para sustentar decisões mais eficientes.

2. Revisão da Literatura

A avaliação da viabilidade econômica de sistemas agrícolas em culturas perenes, como o café, tem incorporado abordagens quantitativas que integram risco, incerteza e dinâmica temporal. A literatura converge para o uso combinado de modelagem estocástica, simulações

de Monte Carlo, teoria de portfólio e opções reais como ferramentas para capturar a complexidade da produção agrícola sob condições incertas.

Indicadores tradicionais – VPL, TIR e Payback – constituem um ponto de partida relevante para análises de investimento. Brioschi et al. (2019) demonstram que, embora o café arábica no Espírito Santo apresente VPL positivo e TIR acima da taxa mínima de atratividade, seu payback descontado supera 16 anos, o que evidencia a necessidade de abordagens que considerem explicitamente o risco intertemporal. Decisões baseadas exclusivamente em fluxos de caixa esperados tendem a subestimar riscos relevantes, especialmente em culturas sujeitas a choques climáticos, à volatilidade de preços e à irreversibilidade parcial dos investimentos.

Um marco metodológico relevante é a função de produção estocástica de Just e Pope (1978), que dissocia os efeitos dos insumos sobre a média e a variância da produção. Essa estrutura é particularmente adequada para culturas como o café, nas quais práticas de manejo afetam simultaneamente a produtividade e a estabilidade produtiva.

Simulações de Monte Carlo têm sido empregadas para estimar distribuições probabilísticas de resultados econômicos. Zinnanti et al. (2019) identificam o rendimento como principal fator de risco na produção de avelã, com papel secundário dos preços – achado aplicável à cafeicultura, dada a elevada variabilidade produtiva da cultura. No contexto brasileiro, Faleiros (2020) e Lima e Alves (2023) demonstram que a diversificação de culturas reduz significativamente o risco total, com resultados diretamente aplicáveis aos sistemas cafeeiros integrados.

A teoria do portfólio de Markowitz permite identificar combinações ótimas de culturas que maximizam o retorno para um dado nível de risco. Alexander e Moran (2013) demonstram que culturas perenes energéticas podem oferecer benefícios de diversificação devido à baixa correlação com as culturas convencionais, embora sua adoção dependa de condições estruturais favoráveis à produtividade e ao mercado.

No âmbito das opções reais, Insley (2002) demonstra que o valor dos investimentos florestais é sensível ao processo estocástico adotado para os preços, com modelos de reversão à média gerando decisões ótimas distintas das obtidas por modelos determinísticos. Song, Zhao e Swinton (2011) ampliam essa abordagem ao evidenciar histerese nas decisões de conversão entre culturas, indicando que os retornos necessários para justificar o investimento em perenes podem superar os níveis de equilíbrio estático. McCarty, Sesmero e Gramig (2016) demonstram que mecanismos contratuais reduzem o prêmio de risco exigido pelos produtores, o que é relevante em sistemas com certificações e contratos de fornecimento.

Culturas perenes apresentam perfil de risco distinto das anuais, com maior exposição nos estágios iniciais. Knápek et al. (2024) indicam que taxas de desconto mais elevadas são necessárias para refletir essa assimetria, o que impacta diretamente a viabilidade econômica. Olba-Ziety et al. (2021) destacam uma transição na literatura, de análises puramente econômicas a abordagens integradas de sustentabilidade e bioeconomia, enquanto Králík et al. (2023) demonstram que políticas públicas podem alterar significativamente a alocação de terras e a competitividade de culturas perenes.

No plano climático, Bunn et al. (2015) projetam uma redução de aproximadamente 50% das áreas adequadas ao cultivo de Coffea arabica até 2050. Ovalle-Rivera et al. (2015) e Läderach et al. (2017) indicam deslocamentos da produção para altitudes e latitudes mais elevadas, com impactos na produtividade e na qualidade da bebida. Schroth et al. (2016) reforçam que o estresse térmico tende a ser mais limitante do que a disponibilidade hídrica, o que demanda estratégias adaptativas, como sistemas agroflorestais.

A revisão evidencia consenso quanto à necessidade de integrar métodos econômicos e estocásticos à análise de culturas perenes. Contudo, persiste uma lacuna na integração simultânea de análise financeira tradicional, modelagem estocástica da produção (Just-Pope), teoria de portfólio, opções reais e cenários climáticos, em uma estrutura unificada aplicada à cafeicultura brasileira – o que representa uma oportunidade para o desenvolvimento de modelos mais realistas e robustos.

3. Metodologia

A pesquisa adota uma abordagem quantitativa e estocástica para analisar o risco e o retorno da produção de café conilon no Espírito Santo e na Bahia, com base nos modelos de Faleiros (2020) e de Lima e Alves (2023), desenvolvidos a partir de Barros, et al. (2019).

3.1. Coleta de dados e caracterização da propriedade típica

Os dados de custos de produção, produtividade e preços foram obtidos por meio da metodologia de painel, que permite caracterizar uma propriedade modal representativa em cada microrregião cafeeira. As séries históricas de custos têm como fonte a Conab (2025); as de preços, o CEPEA (2025). Todos os valores foram deflacionados pelo IGP-DI de agosto de 2025 (FGV, n.d.). As regiões analisadas compreendem os municípios de Itabela (BA) e Pinheiros (ES), com C. canephora, e Patrocínio (MG), com C. arabica.

2.2 Estrutura de Custos e Indicadores de Rentabilidade

A análise econômica fundamenta-se em Barros et al. (2019), com apuração da Receita Bruta (RB), do Custo Operacional Efetivo (COE) e da Receita Líquida Operacional (RLO). A RB corresponde ao produto entre preço recebido e produtividade regional (Equação 1):

$$RB = Preço_{variedade} * Produtividade_{região} \quad (1)$$

O COE equivale ao somatório dos gastos variáveis diretos do processo produtivo – fertilizantes, defensivos, sementes, operações mecânicas, irrigação, transporte, comercialização, mão de obra, custos gerais e encargos financeiros (Equação 2):

$$COE = \sum_{atividade=1}^{n} Custo_{atividade} \quad (2)$$

A RLO é obtida pela diferença entre RB e COE (Equação 3):

$$RLO = RB - COE \quad (3)$$

2.3 Simulação estocástica de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo, proposta por Hertz (1964) como alternativa aos métodos determinísticos, incorpora explicitamente a incerteza por meio de distribuições de probabilidade, permitindo a geração de múltiplos cenários e a estimativa probabilística dos resultados. Neste estudo, foram geradas 10.000 iterações para cada uma das 10 variáveis de risco selecionadas – preços, produtividades e componentes de custo. O ajuste das distribuições foi realizado no software @Risk (Palisade), com seleção baseada no critério de Akaike (AIC), aplicado às observações de seis safras (2019–2024). Uma matriz de correlação foi inserida para preservar a coerência entre variáveis interdependentes durante a simulação. O risco foi quantificado pela probabilidade de margens líquidas negativas, expressa em histogramas de frequência.

A análise de sensibilidade foi conduzida pelo coeficiente de correlação de Spearman – uma medida não paramétrica indicada para relações monotônicas em dados com assimetria ou elevada variabilidade interanual (Hardaker et al., 2015). Esse coeficiente permite hierarquizar os fatores de risco econômicos do sistema produtivo com base na intensidade e no sentido da associação entre cada variável de entrada e a RLO (Clemen et al., 2013; Saltelli et al., 2008).

2.4. Análise de investimento

A viabilidade econômica foi avaliada pelo Valor Presente Líquido (VPL) no horizonte de 20 anos, contemplando as fases de implantação e de operação. Os investimentos iniciais compreendem benfeitorias, terra, implementos e máquinas – estes últimos reinvestidos no 11º

ano. As RLOs anuais projetadas constituem os fluxos líquidos do modelo, enquanto os investimentos representam saídas concentradas no período zero. O VPL é calculado conforme a Equação 4:

$$VPL = \sum_{t=1}^{T} \frac{RLO_t - I_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (4)$$

em que RLO_t é a receita líquida operacional no período t; I_t o reinvestimento em t; i, a taxa de desconto anual real; $T = 20$ anos (com os dois primeiros sem RLO, dado o início comercial da produção no terceiro ano); e I_0, o investimento inicial total. Projetos com VPL > 0 foram considerados economicamente viáveis segundo o critério adotado.

Na ausência de valor de referência consolidado na literatura para a implantação de um hectare de café, adotou-se R$ 50.000/ha como investimento-base para todas as simulações, posicionado em um ponto intermediário entre as distribuições observadas (Tabela 1). Admitiu-se a depreciação total dos ativos ao final do horizonte, sem valor residual, e o valor da terra foi fixado à venda, sem ganho real, ao final do período. A exaustão do cultivo, conforme Conab (2022), é calculada pela Equação 5:

$$Exaustão\ do\ Cultivo = \frac{\sum Custos\ variáveis\ anos\ anteriores\ \left(\frac{R\$}{ha}\right) - \sum Receitas\ anos\ anteriores\ \left(\frac{R\$}{ha}\right)}{Vida\ últi\ do\ pomar\ em\ anos} \quad (5)$$

A Tabela 1 apresenta os valores acumulados de depreciação e de exaustão para as três regiões no período de 20 anos, deflacionados pelo IGP-DI de 2024.

Tabela 1. Valores acumulados de depreciação e de exaustão por região (20 anos), em R$/ha.

Descrição	Conilon - Pinheiros (ES)	Conilon - Itabela (BA)	Arábica - Patrocínio (MS)
Média	97.020,55	41.402,77	55.293,06
Mediana	72.977,90	39.829,01	56.793,94
Mínimo	70.407,88	32.813,54	30.404,76
Máximo	218.921,94	51.262,25	68.808,60
Desvio Padrão	54.527,93	6.193,17	12.729,34

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados da Conab (2022, 2025), deflacionado pelo IGP-DI de 2024 (FGV, 2025).

A dispersão observada na Tabela 1 corrobora a ausência, na literatura, de um valor de referência único para a implantação de um hectare de café, especialmente em sistemas irrigados. Diante da amplitude dos valores simulados – que abrangem desde cenários de baixo capital até sistemas altamente intensivos – e da ausência de relação sistemática entre as regiões irrigadas de C. conilon e a região consolidada e tecnificada de C. arabica, este estudo adota R$ 50.000/ha como investimento inicial-base para todas as simulações. Esse valor posiciona-se em um ponto intermediário entre as distribuições observadas, evitando tanto a superestimação quanto a

subestimação do capital necessário e assegurando a coerência metodológica na construção dos cenários econômicos e na análise subsequente de risco. Admitiu-se, adicionalmente, depreciação total dos ativos ao final do horizonte de 20 anos, sem valor residual para benfeitorias, implementos e máquinas.

Para o investimento em terra, os Valores de Terra Nua (VTN) foram obtidos do Atlas Rural de Terras (INCRA, 2025): Pinheiros (ES), MRT ES-2002, apresenta VTN de R$ 43.995,00 (Tipologia "Geral") e R$ 83.764,00 (Tipologia "Agrícola"); Itabela (BA), MRT BA-510, registra R$ 144.083,99/ha (Tipologia "Agrícola – Café") e R$ 16.734,96/ha (Tipologia "Agrícola – Grãos Diversos"); e Patrocínio (MG), MRT BG-602, apresenta VTN de R$ 80.838,95/ha (Tipologia "Agrícola – Café"). Dado o elevado grau de dispersão – particularmente em Itabela (BA) – adotou-se VTN uniforme de R$ 80.000,00/ha para as três localidades. Em todos os cenários, a terra é adquirida no período inicial, integrando o investimento total, e alienada, sem ganho real, ao final do vigésimo período, sem impacto na análise de viabilidade das culturas. A propriedade típica modelada abrange 50 hectares, com 100% de área produtiva.

A taxa mínima de atratividade foi fixada em 3% a.a., refletindo um custo de oportunidade real conservador diante da elevada variabilidade histórica tanto da taxa Selic – com médias anuais entre 2,75% e 13% no período analisado (BCB, 2025) – quanto do IGP-DI – com variação acumulada anual entre -20,2% e 18% (FGV, n.d.). Análises de sensibilidade foram conduzidas para avaliar o impacto dessa premissa nos resultados.

4. Discussão dos Resultados

Esta seção apresenta e discute os resultados da simulação estocástica de Monte Carlo. Inicialmente, caracterizam-se as funções de distribuição de probabilidade ajustadas para cada variável de risco, com análise das implicações metodológicas de sua seleção. Em seguida, examinam-se o comportamento e a distribuição da Receita Líquida Operacional (RLO) nos três cenários regionais. Na sequência, os coeficientes de correlação de Spearman são utilizados para hierarquizar os determinantes do risco econômico. Por fim, avalia-se a viabilidade econômica do investimento por meio do Valor Presente Líquido (VPL), com análise de sensibilidade ao custo de capital, ao nível de investimento inicial e ao regime de arrendamento de terra.

4.1. Funções de distribuição

A seleção das funções de distribuição de probabilidade para cada variável de entrada constitui uma etapa metodológica fundamental na simulação estocástica, pois determina o

comportamento estocástico das variáveis ao longo das 10.000 iterações. A Tabela 2 apresenta as distribuições selecionadas com base no critério de informação de Akaike (AIC), por região e por variável. Em conjunto, a diversidade de distribuições ajustadas confirma a inadequação de abordagens determinísticas baseadas em médias históricas, reforçando a pertinência do método de Monte Carlo adotado para capturar a heterogeneidade probabilística das variáveis que compõem a estrutura de custos e receitas da cafeicultura.

Tabela 2. Funções de distribuição escolhidas para cada variável

Variáveis	Conilon - Pinheiros (ES)	Conilon - Itabela (BA)	Arábica - Patrocínio (MS)
Fertilizantes e corretivos	Valores Extremos	Valores Extremos	Valores Extremos
Defensivos químicos	Valores Extremos	Valores Extremos Mínimos	Valores Extremos
Operações mecânicas	Valores Extremos Mínimos	Valores Extremos	Valores Extremos
Irrigação	Valores Extremos	Valores Extremos	-
Transp., Comerc./Armaz. e Impostos	Valores Extremos	Valores Extremos	Valores Extremos
Mão de obra	Valores Extremos	Valores Extremos	Normal
Custo Geral, Seguro e Assist. Técnica	Normal	Valores Extremos	Valores Extremos
Financ. Capital de Giro	Valores Extremos Mínimos	Valores Extremos Mínimos	Valores Extremos
Custo operacional	Output	Output	Output
Preço médio	Valores Extremos	Valores Extremos	Valores Extremos
Produtividade	Valores Extremos	Valores Extremos Mínimos	Valores Extremos
Receita Bruta	Output	Output	Output
Margem	Output	Output	Output
Retorno	Output	Output	Output

Fonte: Resultados da pesquisa.

A análise das distribuições ajustadas revela dois padrões predominantes: a Distribuição de Valores Extremos e a Distribuição de Valores Extremos Mínimos – com a ocorrência isolada da distribuição Normal para mão de obra em Patrocínio (MG) e para Custo Geral, Seguro e Assistência Técnica em Pinheiros (ES). A presença de distribuições de valores extremos mínimos sugere que, nessas dimensões, o comportamento histórico é assimétrico negativamente – isto é, eventos de baixo desempenho tendem a ocorrer com maior frequência ou com maior magnitude do que eventos de alto desempenho, o que amplifica o risco de resultados desfavoráveis. O ajuste de distribuição Normal para mão de obra em Patrocínio (MG) e para Custo Geral em Pinheiros (ES) indica, por outro lado, maior regularidade histórica dessas variáveis nesses sistemas, possivelmente associada à maturidade tecnológica e organizacional das lavouras em questão.

4.2. Receita líquida operacional

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as distribuições simuladas da Receita Líquida Operacional (RLO) para os cenários de Itabela (BA), Pinheiros (ES) e Patrocínio (MG), respectivamente. Em Itabela (BA), a distribuição da RLO mostra um perfil favorável: 91% das simulações resultaram em valores positivos, com média de R$ 11.406,75/ha e mediana de R$ 10.267,88/ha, indicando assimetria moderada à direita e concentração dos resultados acima do ponto de equilíbrio operacional.

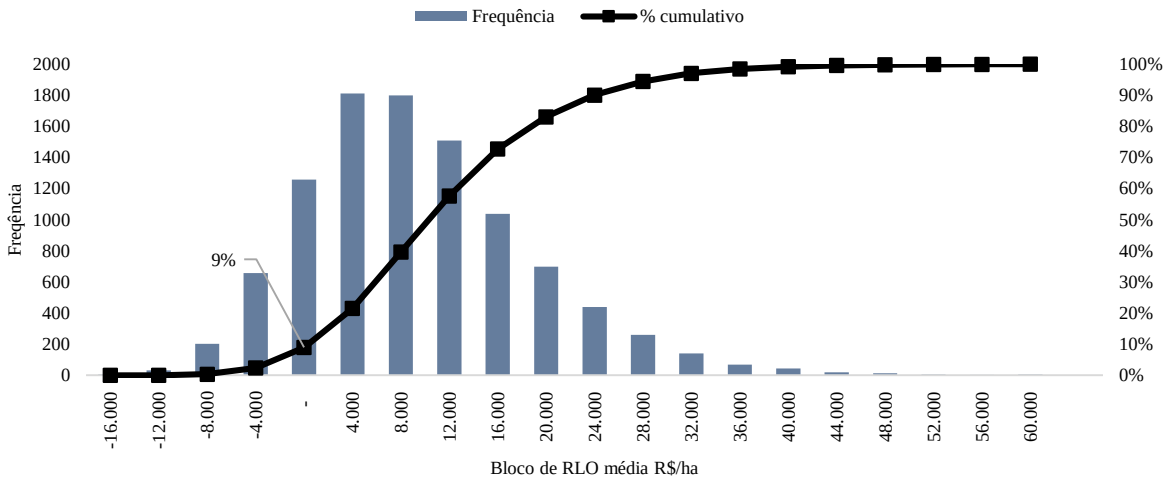

Figura 1. Distribuição das simulações obtidas para a RLO em Itabela (BA).
Fonte: Resultados da pesquisa.

O cenário de Pinheiros (ES) (Figura 2) contrasta fortemente com o cenário anterior. Embora se trate da mesma cultura e de municípios situados a aproximadamente 250 km de distância, a RLO média reduz-se a R$ 1.602,61/ha, com mediana próxima de zero (R$ 142,84/ha), e 49% das simulações indicam resultado operacional negativo. Tal configuração caracteriza uma situação de quase equilíbrio estocástico, na qual a probabilidade de perda econômica se aproxima da de ganho, evidenciando elevada fragilidade financeira estrutural.

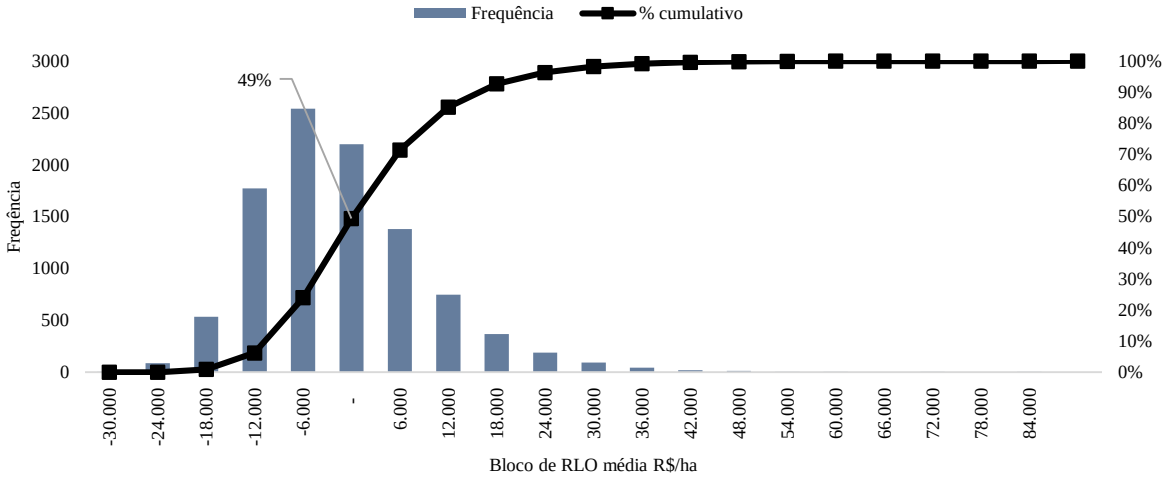

Figura 2. Distribuição das simulações obtidas para a RLO em Pinheiros (ES)
Fonte: Resultados da pesquisa.

Para Patrocínio (MG), com cultivo de C. arabica, registraram-se 85% das simulações com RLO positiva, média de R$ 9.860,31/ha e mediana de R$ 8.178,09/ha. O perfil distributivo posiciona este cenário em uma situação intermediária, combinando desempenho econômico satisfatório com exposição moderada ao risco.

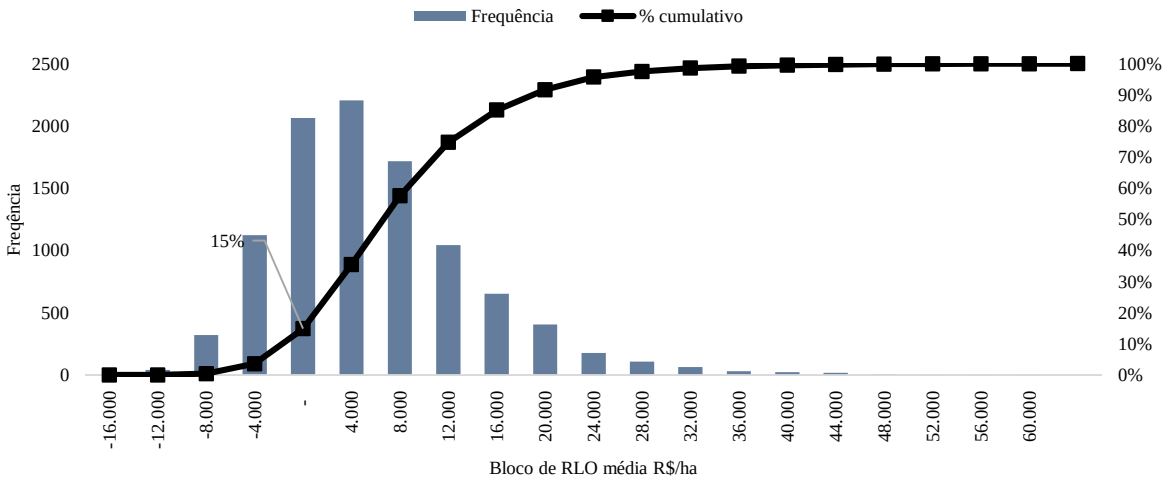

Figura 3. Distribuição das simulações obtidas para a RLO em Patrocínio (MG)
Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 3 sistematiza os principais indicadores estatísticos das distribuições simuladas, permitindo comparação direta entre os cenários. As medidas de tendência central confirmam a hierarquia de desempenho: Itabela apresenta as maiores média e mediana, seguida por Patrocínio, enquanto Pinheiros registra os menores valores em ambas as métricas. A discrepância é particularmente expressiva entre Itabela e Pinheiros – municípios que cultivam a mesma variedade –, sugerindo que as diferenças nos resultados decorrem de condicionantes

locais de produtividade, estrutura de custos e condições edafoclimáticas, e não apenas da escolha da espécie cultivada.

Tabela 3. Estatísticas descritivas das simulações da RLO por cenário (R$/ha)

Variáveis	Conilon - Pinheiros (ES)	Conilon - Itabela (BA)	Arábica - Patrocínio (MS)
Média	1.602,61	11.406,75	9.860,31
Mediana	142,84	10.267,88	8.178,09
Mínimo	- 25.579,59	- 14.381,17	- 15.156,64
1º quartil	- 5.755,87	4.773,25	2.663,40
3º quartil	7.265,60	16.740,06	15.143,11
Máximo	87.196,46	64.211,00	84.504,56
Desvio Padrão	10.718,03	9.439,87	10.498,54
RLO < 0	49%	9%	15%
RLO ≥ 0	51%	91%	85%

Fonte: Resultados da pesquisa.

A análise dos quantis aprofunda esse diagnóstico. O primeiro quartil de Itabela (R$ 4.773,25/ha) supera o terceiro quartil de Pinheiros (R$ 7.265,60/ha), o que implica que, mesmo nos 25% piores resultados do cenário baiano, os valores se aproximam ou superam os 25% melhores do cenário capixaba. O terceiro quartil de Patrocínio (R$ 15.143,11/ha) indica elevado potencial de desempenho no segmento favorável da distribuição, ainda que acompanhado de maior sensibilidade às variáveis produtivas.

Os desvios padrão de Pinheiros e Patrocínio são similares (acima de R$ 10 mil/ha), mas seus significados diferem: em Pinheiros, a volatilidade se manifesta em torno de retornos baixos ou nulos; em Patrocínio, em torno de retornos médios positivos. O desvio levemente inferior de Itabela (R$ 9.439,87/ha), associado a médias expressivamente maiores, configura o perfil de risco-retorno mais eficiente entre os cenários avaliados.

A probabilidade de RLO positiva – indicador sintético do risco econômico operacional – resume esse contraste: 91% em Itabela, 85% em Patrocínio e 51% em Pinheiros. A diferença entre os dois últimos cenários (34 pontos percentuais) reforça que, embora ambos apresentem relativa estabilidade em termos de dispersão absoluta, a assimetria nos níveis médios de retorno implica perfis de risco estruturalmente distintos, com implicações diretas para decisões de investimento e de gestão.

4.3. Determinantes da Receita Líquida Operacional: análise de sensibilidade por correlação de Spearman

A análise dos coeficientes de correlação de Spearman permite identificar e hierarquizar as variáveis que mais influenciaram a dispersão da RLO nas simulações, complementando a

análise descritiva com uma perspectiva de causalidade estocástica. A Tabela 4 apresenta os coeficientes estimados para cada variável e cenário.

Em todos os cenários, o preço médio do café é o principal determinante da RLO, com coeficientes entre 0,79 (Patrocínio) e 0,92 (Itabela), o que confirma a forte dependência dos sistemas cafeeiros das condições de mercado. Esse resultado é consistente com a literatura sobre risco agrícola, que sistematicamente aponta o preço como a principal fonte de variabilidade dos resultados em commodities exportáveis.

Tabela 4. Coeficientes de correlação de Spearman entre variáveis de entrada e a RLO

Variáveis	Conilon - Pinheiros (ES)	Conilon - Itabela (BA)	Arábica - Patrocínio (MS)
Fertilizantes e corretivos	0,16	- 0,06	- 0,57
Defensivos químicos	0,20	- 0,65	- 0,02
Operações mecânicas	- 0,18	- 0,16	0,32
Irrigação	- 0,11	- 0,52	-
Transporte, Comerc./Armaz. e Impostos	- 0,41	0,68	- 0,35
Mão de obra	- 0,40	- 0,22	- 0,19
Custo Geral, Seguro e Assist. Técnica	- 0,27	0,59	- 0,52
Financ. Capital de Giro	- 0,13	0,57	- 0,14
Preço médio	0,87	0,92	0,79
Produtividade	0,33	- 0,39	0,55

Fonte: Resultados da pesquisa.

Além do preço, a produtividade desempenha papel relevante em Pinheiros ($\rho = 0,33$) e, especialmente, em Patrocínio ($\rho = 0,55$), onde seu impacto positivo sobre a RLO é comparável ao de alguns componentes de custo, o que reflete maior sensibilidade agronômica da arábica. Em Itabela, a correlação negativa da produtividade ($\rho = –0,39$) é tecnicamente consistente em cenários de alta produção com preços baixos, em que maiores volumes podem não compensar os custos variáveis adicionais.

Os coeficientes associados aos componentes de custo revelam diferenças estruturais entre os sistemas. Em Pinheiros, a combinação de baixos retornos médios e de sensibilidade negativa a múltiplos itens de custo (mão de obra, transporte, custo geral) resulta em elevada probabilidade de resultados desfavoráveis. Em Itabela, a correlação positiva entre os custos de transporte, comercialização e assistência técnica e a RLO sugere que maiores despesas nessas categorias estão associadas a safras de maior volume e qualidade – indicativo de ganhos de escala e de eficiência operacional. Patrocínio apresenta padrão intermediário, com destaque para a sensibilidade negativa a fertilizantes ($\rho = –0,57$) e a custos gerais ($\rho = –0,52$), o que reflete a elevada intensidade tecnológica da cafeicultura do Cerrado Mineiro.

Em síntese, os resultados indicam que a rentabilidade é predominantemente determinada pelo preço e pela produtividade. Já o perfil de sensibilidade aos custos varia conforme o nível de tecnificação e a estrutura produtiva regional – o que implica implicações diretas para as estratégias de gestão do risco econômico em cada contexto.

4.4. Análise de Investimentos

A avaliação da viabilidade econômica do investimento foi conduzida por meio do Valor Presente Líquido (VPL), calculado para um horizonte de 20 anos, taxa de desconto real de 3% a.a. e propriedade típica de 50 hectares, com investimento inicial de R$ 50.000/ha em infraestrutura produtiva e valor da terra de R$ 80.000/ha – este último com alienação sem ganho real no período final. Os fluxos anuais foram construídos a partir das RLOs simuladas por Monte Carlo (10.000 iterações por cenário).

A Figura 4 apresenta a função de frequência acumulada do VPL para os três cenários, evidenciando diferenças expressivas nas distribuições de viabilidade. Para Pinheiros (ES), houve probabilidade de 74% de VPL negativo, bem acima do calculado para Itabela (BA), com 34%, e para Patrocínio (MG), com 44%.

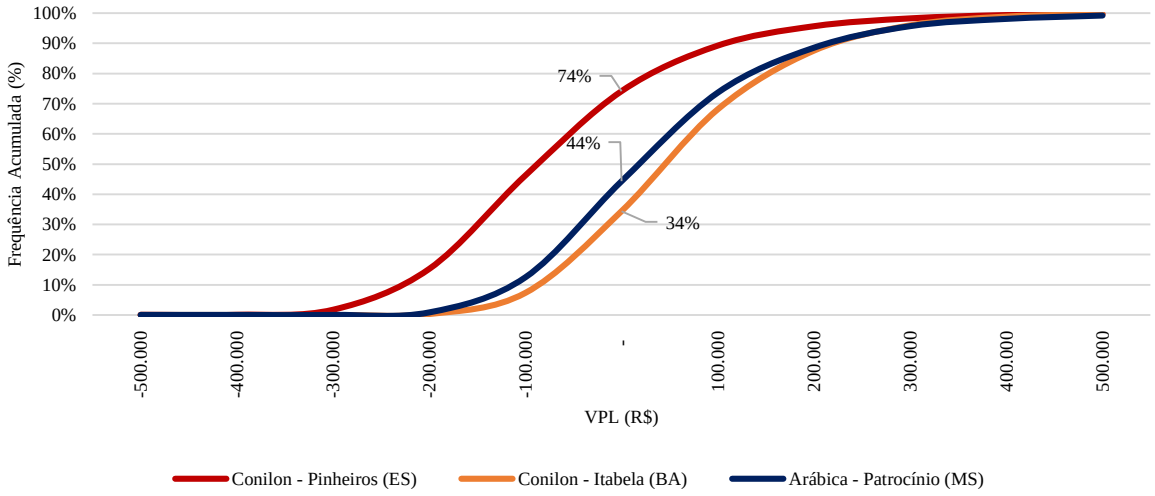

Figura 4. Frequência acumulada para o VPL nas simulações obtidas para cada cenário
Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 5 sistematiza os indicadores estatísticos das distribuições de VPL simuladas. Pinheiros (ES) apresentou a distribuição de VPL mais desfavorável: média de R$ –69.223,72/ha, mediana de R$ –88.148,19/ha e probabilidade de inviabilidade (VPL < 0) de 74%. Esses resultados refletem a insuficiência dos fluxos operacionais para recuperar o capital investido ao longo do ciclo, amplificada pela elevada variabilidade da produtividade e pela estrutura de custos menos competitiva identificada nas análises anteriores. A assimetria da

distribuição – com primeiro quartil de R$ –164.619,11/ha e máximo teórico de R$ 1.040.415,31/ha – evidencia que as ocorrências favoráveis, embora possíveis, são insuficientes para compensar a frequência e a severidade dos cenários negativos.

Tabela 5. Estatísticas descritivas das simulações do VPL por cenário (R$/ha)

Variáveis	Conilon - Pinheiros (ES)	Conilon - Itabela (BA)	Arábica - Patrocínio (MS)
Média	- 69.223,72	57.877,18	37.829,17
Mediana	- 88.148,19	43.112,83	16.020,85
Mínimo	- 421.613,97	- 276.437,50	- 286.490,70
1º quartil	- 164.619,11	- 28.119,54	- 55.471,71
3º quartil	4.191,34	127.018,21	106.315,39
Máximo	1.040.415,31	742.431,79	1.005.517,56
Desvio Padrão	138.948,60	122.378,47	136.103,11
VPL < 0	74%	34%	44%
VPL ≥ 0	26%	66%	56%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Itabela (BA) apresentou os melhores indicadores: média de R$ 57.877,18/ha, mediana de R$ 43.112,83/ha e probabilidade de VPL positivo de 66%. A distribuição mais estreita – com primeiro quartil positivo e menor peso relativo das caudas negativas – indica um perfil de risco operacional substancialmente menor, coerente com os resultados da análise da RLO e do coeficiente de Spearman. Esses resultados validam a consistência das projeções de longo prazo desse sistema e corroboram sua robustez diante de cenários adversos.

Patrocínio (MG) ocupou posição intermediária, com média favorável de R$ 37.829,17/ha e 56% das simulações com VPL positivo. A maior variabilidade em relação à Itabela – desvio padrão de R$ 136.103,11/ha, contra R$ 122.378,47/ha – é consistente com a maior sensibilidade agronômica do arábica às variações climáticas e produtivas, bem como com a estrutura tecnológica diferenciada da região do Cerrado Mineiro. Ainda assim, a predominância de simulações viáveis indica capacidade de geração de valor ao longo do horizonte analisado em proporção considerável de cenários.

O contraste entre os cenários está alinhado às conclusões da análise da RLO e dos coeficientes de Spearman: a viabilidade econômica não é determinada exclusivamente pelo pacote tecnológico adotado, mas é fortemente modulada pelo ambiente produtivo, pela composição regional do risco e pela robustez operacional de cada sistema.

4.5. Sensibilidade de premissas adotadas

A análise de sensibilidade examinou o impacto de variações no custo de capital e no investimento inicial de formação sobre a probabilidade de VPL positivo, bem como o efeito do

regime de arrendamento de terra como alternativa à aquisição. A Figura 5 apresenta a matriz de resultados para as combinações de custo de capital (de 1,5% a 9% a.a.) e de investimento inicial (de R$ 20.000 a R$ 80.000/ha).

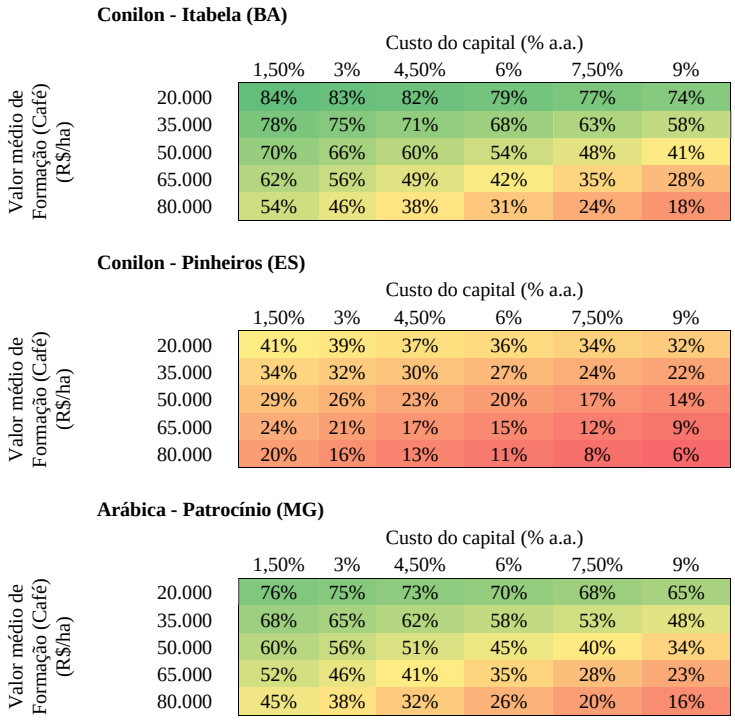

Figura 5. Probabilidade de VPL positivo segundo variações no custo de capital e no investimento de formação
Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados confirmam a relação inversa esperada entre o custo de capital e a viabilidade econômica: a elevação dos desembolsos iniciais amplia o montante a ser recuperado pelos fluxos operacionais futuros, enquanto taxas de desconto mais altas penalizam de forma crescente os fluxos distribuídos ao longo de vários períodos em sistemas de maturação longa e receitas dependentes do desempenho agronômico anual.

A heterogeneidade regional observada nas análises anteriores se mantém com nitidez na análise de sensibilidade. Itabela (BA) apresenta a maior resiliência paramétrica: mesmo no cenário mais adverso – custo de capital de 9% a.a. e formação de R$ 80.000/ha –, 18% das simulações resultam em VPL positivo, proporção superior à observada em cenários mais favoráveis de outras regiões. Em contraste, Pinheiros (ES) permanece estruturalmente vulnerável: na combinação mais benigna (R$ 20.000/ha e 1,5% a.a.), apenas 41% das simulações são viáveis, percentual que recua para 6% no extremo pessimista. A inclinação acentuada da matriz de resultados neste cenário evidencia forte elasticidade ao risco financeiro,

confirmando sua fragilidade estrutural.

Patrocínio (MG) apresenta uma trajetória intermediária, porém estável: a chance de VPL positivo chega a 76% no cenário mais favorável e permanece acima de 50% para taxas de desconto de até 4,5% a.a., com investimento de R$ 50.000/ha. Isso sugere um equilíbrio entre a produtividade estimada, a variação dos resultados e a capacidade de gerar caixa a longo prazo. Além disso, a maior sensibilidade ao custo de capital, em comparação com Itabela, reflete a menor margem operacional média observada na análise da RLO.

A Figura 6 apresenta a análise complementar do cenário de arrendamento de terra. Na estrutura de aquisição de terra, este ativo não interfere na análise de viabilidade por ser alienado sem ganho real ao final do horizonte. Contudo, quando substituídos pelo arrendamento, os pagamentos recorrentes reduzem a RLO anual, pressionando os fluxos de caixa ao longo de todo o ciclo e comprometendo a viabilidade. Itabela (BA) preserva elevadas probabilidades de VPL positivo, mesmo com arrendamentos mais onerosos, absorvendo valores anuais de até R$ 3.000,00/ha sem comprometer a viabilidade, com 50% de probabilidade de VPL positivo (para formação de R$ 50.000/ha). Patrocínio (MG) sustenta probabilidade equivalente a arrendamentos de até R$ 1.000,00/ha. Pinheiros (ES) revela elevada fragilidade em relação a pagamentos recorrentes, alcançando o limiar de viabilidade apenas com arrendamentos inferiores a R$ 1.000,00/ha.

Esse padrão indica que sistemas de menor produtividade média ou de maior variabilidade perdem competitividade rapidamente à medida que os encargos fixos sobre o uso da terra aumentam, pois competem com os fluxos operacionais positivos gerados em cada safra. Assim, a decisão entre arrendamento e aquisição não é neutra em termos de risco: regiões mais eficientes podem se beneficiar economicamente do arrendamento, enquanto sistemas operacionalmente mais frágeis tendem a exigir a propriedade do ativo terra para preservar a rentabilidade potencial, na medida em que sua alienação ao final do ciclo funciona como mecanismo de recuperação parcial do capital investido.

5. Considerações finais

Este estudo teve como objetivo estimar a viabilidade econômica do investimento em cafeicultura sob incerteza, por meio de simulações de Monte Carlo aplicadas a diferentes regiões produtoras e a diferentes sistemas tecnológicos. Buscou-se mapear a distribuição probabilística dos retornos, mensurar a probabilidade de sucesso econômico e identificar os principais direcionadores de risco, oferecendo subsídios para decisões estratégicas de investimento e de gestão no setor cafeeiro. Sua relevância fundamenta-se no fato de que

decisões de investimento na atividade ainda se apoiam, em grande medida, em abordagens determinísticas, insuficientes para capturar a distribuição dos riscos associados à volatilidade de produtividade, preços e custos ao longo do horizonte produtivo.

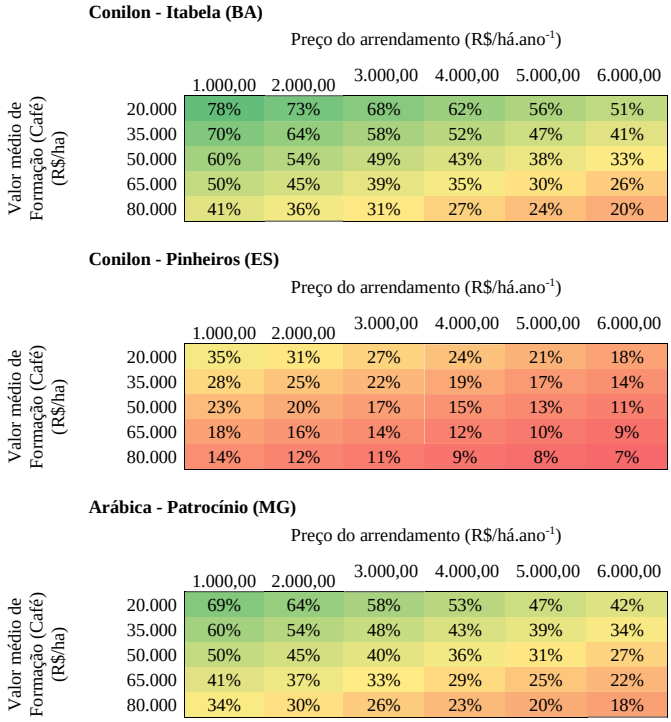

Figura 6. Probabilidade de VPL positivo segundo variações no custo de formação e no preço de arrendamento anual
Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados demonstram que a Receita Líquida Operacional é predominantemente determinada pelas variáveis de receita e de desempenho produtivo, ao passo que o risco econômico do investimento decorre, sobretudo, da estrutura regional de custos, das decisões de implantação e das exigências financeiras ao longo do ciclo. A análise comparativa evidencia diferenças estruturais que explicam a dispersão observada nas distribuições simuladas de VPL: Pinheiros (ES) configura-se como o sistema mais vulnerável, com elevada sensibilidade à variabilidade operacional e dependência de conjunturas favoráveis; Itabela (BA) demonstra maior capacidade de absorção de choques, preservando resultados positivos em ampla faixa de condições; e Patrocínio (MG) ocupa posição intermediária, equilibrando competitividade com exposição moderada ao risco produtivo e ao custo de capital.

A consistência entre as distribuições simuladas de RLO e os indicadores estatísticos derivados reforça a robustez do modelo e sugere que as diferenças interregionais estão ancoradas não apenas em atributos agronômicos – como a produtividade potencial –, mas

também em fatores econômicos estruturais, como escala viável, intensidade tecnológica e eficiência operacional local. Nesse contexto, a adoção de métricas determinísticas baseadas em valores médios revela-se insuficiente para apoiar decisões estratégicas em culturas perenes de longo horizonte, caracterizadas por elevado capital imobilizado na fase inicial e por significativa incerteza nos fluxos futuros.

A análise de sensibilidade amplia essa perspectiva ao demonstrar que variações nos dispêndios de formação, no custo de capital e na modalidade de acesso à terra alteram substancialmente a probabilidade de retorno positivo, indicando que tais variáveis desempenham papel decisivo na sustentabilidade econômica do empreendimento. Para Itabela, o modelo aponta resiliência expressiva mesmo sob condições adversas; para Patrocínio, estabilidade relativa; e para Pinheiros, intensificação rápida do risco financeiro à medida que aumentam os custos iniciais ou as taxas mínimas de atratividade. Instrumentos de política pública e de gestão privada que atenuem restrições financeiras – como crédito rural subsidiado, mecanismos de seguro agrícola ou expansão gradual da área plantada – podem exercer influência determinante sobre a viabilidade econômico-financeira, especialmente em ambientes produtivos menos robustos. Em síntese, o investimento em cafeicultura sob incerteza requer avaliação probabilística que incorpore a variância, a distribuição de resultados e a probabilidade de perda, dado que a localização, o nível tecnológico e a estrutura de capital condicionam conjuntamente o perfil de risco-retorno do empreendimento.

Do ponto de vista metodológico, este estudo apresenta limitações inerentes à dependência de dados secundários de custos, à necessidade de aproximações para os investimentos em formação e à utilização de funções de distribuição empíricas com séries históricas de curta extensão. Adicionalmente, o modelo não incorpora explicitamente os efeitos cumulativos das mudanças climáticas, as variações plurianuais de preços ou as inovações tecnológicas ao longo do horizonte de análise. Pesquisas futuras podem expandir a abordagem por meio de modelos multivariados que capturem as dependências entre as fontes de risco, simulações climáticas acopladas, precificação estocástica de commodities e comparações com culturas alternativas ou com arranjos agroflorestais complementares. A incorporação de instrumentos de hedge, seguros e políticas regionais de crédito rural pode, adicionalmente, aprofundar a compreensão do papel institucional na redução do risco em sistemas perenes. A agenda de pesquisa permanece, assim, aberta a desenvolvimentos que fortaleçam a tomada de decisão estratégica na cafeicultura e em culturas perenes similares.

Referências

ALEXANDER, Peter; MORAN, Dominic. Impact of income variability from perennial energy crops on the crop selection of risk-averse farmers. **Energy Policy**, v. 52, p. 587-596, 2013.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Sistema Gerenciador de Séries Temporais** – SGS: série 432 – taxa Selic (meta). Brasília, 2025. Disponível em: https://www3.bcb.gov.br/sgspub/. Acesso em: 12 nov. 2025.

BARROS, Geraldo S. C.; ALVES, L. R. A.; OSAKI, M.; ADAMI, A. C. O. **Gestão de negócios agropecuários: com foco no patrimônio**. Campinas: Alínea, 2019.

BRIOSCHI, P. F. et al. Análise de custo e viabilidade econômica do café arábica em Venda Nova do Imigrante, ES. **Revista Brasileira de Gestão e Engenharia**, n. 20, p. 127-136, jul./dez. 2019.

BUNN, Christian et al. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, v. 129, p. 89-101, 2015.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **Indicadores de preços do café no Brasil**: arábica e robusta. Piracicaba: ESALQ/USP, 2025. Disponível em: https://cepea.esalq.usp.br/cafe/. Acesso em: 12 nov. 2025.

CLEMEN, Robert T.; REILLY, Terence. **Making hard decisions with decision tools**. 3. ed. Boston: Cengage Learning, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Séries históricas**. Brasília, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/series-historicas/. Acesso em: 12 nov. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Notas metodológicas sobre as estimativas de custos de produção de café**. Brasília, DF: Conab, 2022.

FALEIROS, Gabriel Diniz. Risco de produção agrícola no Sul do Brasil: aspectos de sistemas produtivos e rentabilidade. 2020. **Dissertação (Mestrado em Ciências)** – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). **Índice Geral de Preços** – Disponibilidade Interna (IGP-DI). Disponível em: https://portalibre.fgv.br/estudos-e-pesquisas/indices-de-precos/igp-di. Acesso em: 12 nov. 2025.

HARDAKER, J. B. et al. **Coping with risk in agriculture: applied decision analysis**. 3. ed. Wallingford: CABI, 2015.

HERTZ, David B. Risk analysis in capital investment. **Harvard Business Review**, v. 42, n. 1, p. 95-106, 1964.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção de café (em grão) no Brasil**. 2024. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_%5Bmensal%5D/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2024/estProdAgri_202409.pdf. Acesso em: 12 nov. 2025.

INSLEY, Margaret. A real options approach to the valuation of a forestry investment. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 44, n. 3, p. 471-492, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). **Atlas Rural de Terras**. Brasília, DF: INCRA, 2025.

JUST, Richard E.; POPE, Rulon D. Stochastic specification of production functions and economic implications. **Journal of Econometrics**, v. 7, n. 1, p. 67-86, 1978.

KLAUER, Bernd. A methodological approach to the comparison of scenarios. **Ecological Economics**, v. 36, n. 1, p. 137-155, 2001.

KNÁPEK, J. et al. Modelling the impact of business risk on the competitiveness of purpose-grown biomass of annual and perennial crops. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 202, p. 114707, 2024.

KRÁLÍK, T. et al. Ecosystem services and economic competitiveness of perennial energy crops in the modelling of biomass potential: a case study of the Czech Republic. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 113120, 2023.

KURATA, H.; HAMADA, M. Probability distribution fitting with information criteria: guidance for practical applications. **Journal of Applied Statistics**, v. 46, n. 5, p. 854-870, 2019.

LÄDERACH, Peter et al. Climate change adaptation of coffee production in space and time. **Climatic Change**, v. 141, n. 1, p. 47-62, 2017.

LIMA, F. F.; ALVES, L. R. A. Portfolio theory approach to plan areas for growing cotton, soybean, and corn in Mato Grosso, Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 3, e258224, 2023.

MCCARTY, T.; SESMERO, J.; GRAMIG, B. Contracting for perennial energy crops under uncertainty and costly reversibility. In: **ANNUAL MEETING OF THE AAEA**, 2016, Boston. Proceedings... Boston, 2016.

OLBA-ZIĘTY, E.; STOLARSKI, M. J.; KRZYŻANIAK, M. Economic evaluation of the production of perennial crops for energy purposes: a review. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 7147, 2021.

OVALLE-RIVERA, Oriana et al. Projected shifts in Coffea arabica suitability among major global producing regions due to climate change. **PLoS ONE**, v. 10, n. 4, e0124155, 2015.

SALTELLI, Andrea et al. **Global sensitivity analysis**: the primer. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

SCHROTH, G. et al. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: patterns, opportunities and limits to adaptation. **Science of the Total Environment**, v. 556, p. 231-241, 2016.

SONG, F.; ZHAO, J.; SWINTON, S. M. Switching to perennial energy crops under uncertainty and costly reversibility. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 93, n. 3, p. 768-783, 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Brazil: coffee annual** – coffee annual report 2025/26. Washington, DC, 2025. Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/brazil-coffee-annual-10. Acesso em: 12 nov. 2025.

ZINNANTI, C. et al. Economic performance and risk of farming systems specialized in perennial crops: an analysis of Italian hazelnut production. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102645, 2019.