ELÓI MARTINS SENHORAS
(organizador)

AGRONEGÓCIO

Olhares Temáticos



IOLE EDITORA

AGRONEGÓCIO

Olhares Temáticos

AGRONEGÓCIO

Olhares Temáticos

ELÓI MARTINS SENHORAS
(organizador)

BOA VISTA/RR
2026

Editora IOLE

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n. 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.



EXPEDIENTE

Revisão
Elói Martins Senhoras
Geane Ribeiro Silva Monteiro

Capa
Alokike Gael Chloe Hounkonnou
Elói Martins Senhoras

Projeto Gráfico e Diagramação
Elói Martins Senhoras
Balbina Líbia de Souza Santos

Conselho Editorial
Abigail Pascoal dos Santos
Charles Pennaforte
Claudete de Castro Silva Vitte
Elói Martins Senhoras
Fabiano de Araújo Moreira
Julio Burdman
Marcos Antônio Fávaro Martins
Rozane Pereira Ignácio
Patrícia Nasser de Carvalho
Simone Rodrigues Batista Mendes
Vitor Stuart Gabriel de Pieri

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO (CIP)

Se69 SENHORAS, Elói Martins.

Agronegócio: Olhares Temáticos. Boa Vista: Editora IOLE, 2026.

Série: Administração. Editor: Elói Martins Senhoras.

ISBN: 978-65-979656-2-5

1 - Agronegócio. 2 - Brasil. 3 - Estudos de Caso. 4 - Economia.
I - Título. II - Senhoras, Elói Martins. III - Administração. IV - Série

CDD–658

A exatidão das informações, conceitos e opiniões é de exclusiva responsabilidade dos autores.
O presente livro contou com avaliação às cegas no sistema double-blind-review.



EDITORIAL

A editora IOLE tem o objetivo de divulgar a produção de trabalhos intelectuais que tenham qualidade e relevância social, científica ou didática em distintas áreas do conhecimento e direcionadas para um amplo público de leitores com diferentes interesses.

As publicações da editora IOLE têm o intuito de trazer contribuições para o avanço da reflexão e das práxis em diferentes áreas do pensamento e para a consolidação de uma comunidade de autores comprometida com a pluralidade do pensamento e com uma crescente institucionalização dos debates.

O conteúdo produzido e divulgado neste livro é de inteira responsabilidade dos autores em termos de forma, correção e confiabilidade, não representando discurso oficial da editora IOLE, a qual é responsável exclusivamente pela editoração, publicação e divulgação da obra.

Concebido para ser um material com alta capilarização para seu potencial público leitor, o presente livro da editora IOLE é publicado nos formatos impresso e eletrônico a fim de propiciar a democratização do conhecimento por meio do livre acesso e divulgação das obras.

Prof. Dr. Elói Martins Senhoras

(Editor Chefe)

Copyright © Editora IOLE
2026

CAPÍTULO 1

Métodos Quantitativos Aplicados à Análise de Investimento com Drones para Pulverização Agrícola

MÉTODOS QUANTITATIVOS APLICADOS À ANÁLISE DE INVESTIMENTO COM DRONES PARA PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA

Walter Roberto Hernández Vergara[1]

Fábio Alves Barbosa[2]

A escassez de recursos constitui um dos princípios fundamentais da ciência econômica, uma vez que indivíduos, empresas e instituições precisam decidir como alocar recursos limitados diante de múltiplas alternativas de investimento. Nesse contexto, a tomada de decisão econômica envolve a seleção de projetos capazes de maximizar a geração de valor, conciliando rentabilidade, eficiência operacional, sustentabilidade e restrições financeiras.

Nas organizações produtivas, os investimentos em ativos, tecnologias e processos são fundamentais para ampliar a competitividade e assegurar a sustentabilidade econômica de longo prazo. Entretanto, as decisões de investimento são frequentemente tomadas em ambientes caracterizados por incerteza, nos quais variáveis como custos, receitas, taxas de desconto, vida útil dos ativos, produtividade e condições de mercado não podem ser

[1]Professor da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). E-mail para contato: waltervergara@ufgd.edu.br

[2] Professor da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail para contato: fabiobarbosa@ufgd.edu.br

estimadas com precisão absoluta. Conforme destacado por Bresters (2021), limitações orçamentárias e restrições de capital tornam indispensável a avaliação criteriosa das alternativas disponíveis, exigindo métodos capazes de incorporar os riscos associados às projeções econômicas.

Na literatura de Engenharia Econômica, indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback são amplamente utilizados para avaliar a viabilidade de projetos. Contudo, esses métodos tradicionalmente assumem valores determinísticos para as variáveis de entrada, o que pode resultar em estimativas excessivamente simplificadas da realidade. Em cenários caracterizados por elevada volatilidade operacional e financeira, torna-se necessário incorporar abordagens probabilísticas que permitam avaliar a influência das incertezas sobre os resultados econômicos esperados.

Nesse contexto, a análise de sensibilidade e a simulação de Monte Carlo destacam-se como ferramentas relevantes para o gerenciamento de riscos em projetos de investimento. A análise de sensibilidade possibilita identificar quais variáveis exercem maior influência sobre os indicadores econômicos, enquanto a simulação de Monte Carlo permite representar a variabilidade dos parâmetros por meio de distribuições de probabilidade, gerando milhares de cenários possíveis e fornecendo estimativas mais robustas acerca da viabilidade do empreendimento.

A incorporação dessas técnicas torna-se particularmente relevante na agricultura moderna, setor que enfrenta crescente pressão por produtividade, eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. Nesse cenário, a Agricultura 4.0 tem promovido a adoção de tecnologias digitais capazes de transformar os sistemas produtivos por meio da automação, da conectividade e da utilização intensiva de dados. Entre essas tecnologias, destacam-se os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como

drones, que vêm sendo utilizados em atividades de monitoramento, mapeamento, sensoriamento remoto e aplicação localizada de insumos agrícolas.

A pulverização agrícola por drones representa uma das aplicações mais promissoras da agricultura de precisão. Essa tecnologia permite maior controle operacional, redução do desperdício de insumos, menor exposição dos operadores a produtos químicos e potencial aumento da eficiência na aplicação de defensivos agrícolas. Além disso, os drones apresentam vantagens operacionais em áreas de difícil acesso, terrenos irregulares e culturas de elevado valor agregado, ampliando as possibilidades de utilização em diferentes sistemas produtivos.

Apesar do avanço tecnológico observado nos últimos anos, a literatura científica ainda apresenta limitações relevantes quanto à avaliação econômica dessa tecnologia. Grande parte dos estudos concentra-se nos aspectos agronômicos e operacionais da pulverização, enquanto análises integradas envolvendo custos de aquisição, manutenção, depreciação, treinamento, regulamentação, produtividade operacional e gestão de riscos permanecem relativamente escassas. Consequentemente, ainda existem lacunas metodológicas relacionadas à construção de modelos capazes de integrar variáveis técnicas, econômicas e probabilísticas em uma estrutura analítica consistente para apoiar decisões de investimento.

Adicionalmente, observa-se uma limitada aplicação de métodos quantitativos avançados, tais como análise de sensibilidade global, simulação de Monte Carlo e modelagem estocástica, na avaliação da viabilidade econômico-financeira da pulverização agrícola por drones. Essa lacuna reduz a capacidade dos gestores de compreender como as incertezas operacionais, climáticas e econômicas afetam o desempenho financeiro dos investimentos realizados.

Diante desse contexto, o presente capítulo tem como objetivo desenvolver uma análise econômico-financeira da utilização de drones na pulverização agrícola, buscando identificar as condições operacionais e econômicas que proporcionam a melhor relação custo-benefício para o investimento. Para tanto, são incorporados índices de elasticidades, análises de sensibilidade e simulações de Monte Carlo, que possibilitam medir o efeito das incertezas em indicadores financeiros e determinar quais variáveis têm maior impacto na criação de valor econômico.

A principal contribuição deste trabalho consiste na proposição de um modelo quantitativo que integra avaliação econômica, análise de risco e simulação probabilística para apoiar decisões de investimento em tecnologias da Agricultura 4.0. Dessa forma, o estudo busca ampliar a compreensão sobre a viabilidade econômica da pulverização agrícola por drones, fornecendo subsídios técnicos e gerenciais para produtores rurais, investidores e formuladores de políticas voltadas à modernização do setor agrícola.

REVISÃO DA LITERATURA

A pulverização agrícola consiste em uma tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários baseada na atomização de líquidos em gotas de diferentes tamanhos, que são direcionadas ao alvo biológico de interesse. A eficiência desse processo depende não apenas da geração das gotas, mas também de sua deposição adequada sobre o alvo, considerando parâmetros como tamanho, densidade, uniformidade de distribuição e capacidade de cobertura. Essa técnica é amplamente utilizada no controle de insetos, fungos, bactérias e plantas daninhas, desempenhando papel fundamental na manutenção da produtividade agrícola e na proteção fitossanitária das culturas.

A qualidade da pulverização está diretamente associada à interação entre fatores operacionais, ambientais e tecnológicos. Variáveis como velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar, altura de aplicação, espectro de gotas e características do equipamento influenciam significativamente a eficiência da deposição e as perdas por deriva. Nesse contexto, a tomada de decisão relacionada à aplicação de defensivos exige uma abordagem multidisciplinar, integrando conhecimentos de engenharia agrícola, mecanização, agronomia, meteorologia e gestão operacional. Segundo Casali (2015), a adoção de tecnologias de aplicação adequadas contribui para o aumento da produtividade, a redução do consumo de insumos, a mitigação dos impactos ambientais e a diminuição dos custos operacionais das atividades agrícolas.

O avanço da Agricultura de Precisão e, mais recentemente, da Agricultura 4.0, impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias para monitoramento e aplicação localizada de insumos. Entre essas inovações destacam-se os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, que vêm transformando os sistemas produtivos por meio da coleta de dados em tempo real, automação de processos e aplicação mais eficiente de defensivos agrícolas.

Os drones utilizados na agricultura podem ser classificados, de forma geral, em duas categorias principais: asa fixa e multirrotores. Os modelos de asa fixa apresentam maior eficiência aerodinâmica e capacidade de cobertura territorial, sendo particularmente indicados para operações de monitoramento, mapeamento e sensoriamento remoto em grandes áreas agrícolas. Sua configuração estrutural permite voos mais longos e menor consumo energético em comparação aos drones multirrotores, proporcionando maior autonomia operacional e redução dos custos relacionados ao uso de baterias e recargas (PARLANGELI; CAVICHIOLI, 2021).

Por outro lado, os drones multirrotores possuem múltiplos rotores que possibilitam decolagem e pouso vertical, elevada estabilidade de voo e capacidade de manter posição fixa durante a operação. Essas características tornam essa categoria especialmente adequada para atividades que exigem alta precisão operacional, como pulverização de fitossanitários, aplicação de fertilizantes foliares, manejo nutricional, monitoramento hídrico e inspeções detalhadas das lavouras (SISHODIA; RAY; SINGH, 2020). Além disso, sua flexibilidade operacional permite a atuação em áreas com relevo irregular, obstáculos físicos ou condições que dificultam o acesso de pulverizadores terrestres convencionais (HUNT; DAUGHTRY, 2018).

No contexto da pulverização agrícola, os drones multirrotores são equipados com reservatórios, sistemas de bombeamento, bicos pulverizadores, sensores embarcados e controladores eletrônicos capazes de regular parâmetros de aplicação em tempo real. Esses equipamentos transportam e distribuem produtos líquidos ou sólidos de forma localizada, contribuindo para o uso racional dos insumos agrícolas. Atualmente, os modelos mais difundidos no mercado brasileiro são produzidos pela DJI, com capacidades de carga variando entre 10, 20, 30 e 40 litros de calda, atendendo diferentes escalas operacionais e necessidades produtivas (MONTE; MOURA; SANTOS, 2023).

Sob a perspectiva da engenharia econômica e da gestão da produção, a adoção de drones para pulverização representa não apenas uma inovação tecnológica, mas também uma alternativa potencial para aumentar a eficiência operacional dos sistemas agrícolas. A substituição parcial ou complementar de métodos convencionais pode reduzir custos de mão de obra, diminuir perdas de insumos, ampliar a precisão das aplicações e melhorar indicadores de produtividade. Entretanto, a efetiva viabilidade dessa tecnologia depende da análise integrada de fatores técnicos,

econômicos e operacionais, incluindo investimento inicial, custos de manutenção, vida útil dos equipamentos, produtividade operacional, eficiência agronômica e riscos associados às condições climáticas e de mercado.

A demonstração dos fluxos de caixa constitui uma das principais ferramentas de apoio à tomada de decisão, pois permite representar, ao longo do horizonte de planejamento, as entradas e saídas monetárias associadas ao empreendimento.

Entretanto, a avaliação econômica de investimentos é realizada em ambientes caracterizados por diferentes níveis de incerteza. Variáveis como demanda, produtividade, custos operacionais, preços de mercado, taxa de desconto, vida útil dos ativos e condições macroeconômicas podem sofrer alterações ao longo do tempo, afetando significativamente os indicadores de desempenho econômico-financeiro. Dessa forma, a simples utilização de valores determinísticos pode conduzir a conclusões imprecisas sobre a viabilidade do investimento.

Sob a perspectiva da Engenharia Econômica, o risco está associado à possibilidade de divergência entre os resultados projetados e os resultados efetivamente observados. Quanto maior a variabilidade das variáveis de entrada de um modelo econômico, maior tende a ser a incerteza relacionada à rentabilidade futura do empreendimento. Nesse sentido, torna-se necessário utilizar métodos capazes de quantificar a influência dessas variáveis sobre os resultados esperados.

A análise de sensibilidade destaca-se como uma das técnicas mais utilizadas para a avaliação de riscos em projetos de investimento. Seu objetivo consiste em identificar quais variáveis exercem maior influência sobre os indicadores econômicos do projeto, permitindo ao analista compreender o grau de

vulnerabilidade do investimento diante de alterações nos parâmetros considerados no modelo (VERGARA; CRUZ, 2025a; 2025b).

Além de apoiar a identificação das variáveis críticas, a análise de sensibilidade contribui para o direcionamento de estratégias de mitigação de riscos, permitindo que gestores concentrem esforços sobre os fatores que efetivamente afetam a geração de valor econômico. Assim, a ferramenta amplia a robustez do processo decisório ao evidenciar quais parâmetros exigem maior controle operacional ou monitoramento gerencial.

De acordo com o Centro de Estudos Especiais do Banco Central (2020), a análise de sensibilidade pode ser classificada em duas modalidades principais. A análise unidirecional avalia o impacto da variação isolada de uma única variável sobre o resultado do modelo, mantendo constantes os demais parâmetros. Já a análise bidirecional, frequentemente denominada análise de cenários, considera alterações simultâneas em duas ou mais variáveis, permitindo representar situações mais próximas da realidade operacional dos investimentos.

No presente estudo, adotou-se a análise de sensibilidade unidirecional em razão de sua capacidade de identificar, de forma objetiva, a contribuição individual de cada variável para a variabilidade do indicador econômico analisado. O procedimento metodológico compreende as seguintes etapas:

- Definição do indicador econômico de referência para avaliação da viabilidade do investimento;
- Identificação das variáveis sujeitas à incerteza;
- Determinação dos limites mínimo e máximo de variação para cada variável;
- Reavaliação do indicador econômico para cada cenário gerado;

- Construção dos gráficos de sensibilidade, também conhecidos como diagramas de tornado ou gráficos de teia de aranha, utilizados para visualizar a influência relativa das variáveis analisadas.

Os indicadores mais difundidos na literatura para avaliação de investimentos são o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Ambos derivam dos princípios do fluxo de caixa descontado e incorporam o conceito do valor do dinheiro no tempo, fundamento central da teoria financeira moderna.

O Valor Presente Líquido representa a diferença entre o valor presente dos benefícios econômicos futuros e o valor presente dos investimentos necessários para sua obtenção. Sua interpretação está diretamente relacionada à geração de riqueza econômica, sendo considerado financeiramente atrativo todo projeto cujo VPL seja positivo.

A Taxa Interna de Retorno, por sua vez, corresponde à taxa de desconto que torna o VPL igual a zero, representando a rentabilidade implícita do investimento. Apesar de sua ampla utilização, a literatura especializada aponta limitações relevantes associadas à TIR. Entre elas destacam-se a possibilidade de múltiplas soluções para fluxos de caixa não convencionais, a hipótese implícita de reinvestimento dos fluxos intermediários à própria TIR, dificuldades de comparação entre projetos mutuamente excludentes e potenciais inconsistências em investimentos de diferentes escalas ou horizontes temporais (DWIVEDI; MAHESHWARI; BHATIA, 2025).

Além disso, o VPL apresenta maior aderência ao objetivo de maximização do valor econômico da firma, uma vez que incorpora explicitamente o custo de oportunidade do capital por meio da taxa mínima de atratividade. Por essa razão, o Valor Presente Líquido foi

adotado neste estudo como principal indicador para a análise da viabilidade econômico-financeira da tecnologia avaliada.

A análise de investimentos tradicional frequentemente concentra-se na obtenção de um único valor para os indicadores econômicos, assumindo implicitamente que as variáveis utilizadas nas projeções são conhecidas com precisão. Contudo, essa abordagem pode ocultar a influência de fatores críticos e gerar interpretações excessivamente otimistas acerca da viabilidade do empreendimento.

Nesse contexto, a elasticidade do Valor Presente Líquido surge como uma importante ferramenta analítica para avaliar a sensibilidade econômica dos investimentos. O conceito de elasticidade mede a intensidade da resposta de uma variável dependente diante de alterações relativas em uma variável explicativa. Aplicada ao VPL, a elasticidade permite quantificar quanto a rentabilidade do projeto varia em resposta a mudanças percentuais nos parâmetros de entrada.

Sob a ótica gerencial, a elasticidade fornece informações estratégicas sobre a estrutura de risco do investimento. Variáveis com elevada elasticidade exercem influência significativa sobre a geração de valor econômico e, consequentemente, merecem maior atenção durante o processo de planejamento, monitoramento e controle. Por outro lado, variáveis com baixa elasticidade tendem a apresentar impacto reduzido sobre os resultados, representando menor prioridade gerencial.

A utilização da elasticidade do VPL amplia a capacidade interpretativa da análise de sensibilidade, permitindo não apenas identificar quais variáveis são relevantes, mas também mensurar a magnitude de sua influência sobre a viabilidade econômica do projeto. Dessa forma, a análise deixa de ser exclusivamente descritiva e passa a fornecer subsídios quantitativos para a

formulação de estratégias para minimizar risco e otimizar os investimentos.

A fundamentação matemática dessa abordagem está associada à teoria do fluxo de caixa descontado (FCD), amplamente utilizada na avaliação de ativos e projetos de investimento. O método baseia-se no princípio de que o valor de um ativo corresponde ao valor presente dos fluxos de caixa futuros que ele é capaz de gerar, descontados por uma taxa que reflita o risco e o custo de oportunidade do capital (DUBONJIĆ; MILANOVIĆ, 2002; 2005; FARR; FABER, 2023).

No fluxo de caixa de um projeto, os investimentos iniciais representam desembolsos destinados à aquisição de ativos, implantação da infraestrutura produtiva, treinamento, adequações operacionais, manutenção, supervisão técnica e demais recursos necessários à operacionalização do empreendimento. Em contrapartida, os fluxos positivos decorrem da geração de receitas e economias operacionais proporcionadas pelo investimento.

Conforme destacado por Vergara *et al*. (2021), os custos totais de um projeto englobam despesas diretas e indiretas relacionadas à operação, incluindo mão de obra, encargos sociais, materiais, insumos, manutenção, depreciação, tributos e demais componentes necessários à execução das atividades. A compreensão da influência desses elementos sobre o VPL constitui etapa fundamental para a identificação dos fatores críticos de sucesso e para a construção de modelos mais robustos de avaliação econômica sob condições de risco e incerteza.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de custeio direto é utilizado para coletar, analisar e relatar dados sobre os gastos do projeto, com o objetivo de

precificar o serviço, controlar despesas, maximizar lucros e auxiliar na tomada de decisões.

No custeio direto, apenas os custos e despesas variáveis que participam do volume de produção, como matéria-prima e mão de obra, são considerados no custo do produto. Os custos fixos, como aluguel, energia e serviços gerais, são registrados diretamente na conta de resultado do período, sem passar pelo estoque.

Fluxo de caixa e indicadores financeiros

O fluxo de caixa de um período t pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$FC_t = R_t - C_t$$

Onde,

- R_t – entrada (receitas) de caixa no período t.
- C_t – saída (custos) de caixa no período t.

Segundo o modelo FCD, o VPL depende dos fluxos de caixa FC1, FC2, ..., FCt, da taxa de desconto i, do investimento inicial I_0 e do valor residual (VR). Em outras palavras, o modelo matemático do VPL pode ser representado da seguinte forma:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{FC_t}{(1+i)^t} + \frac{VR}{(1+i)^t}$$	(1)

Considerando um valor residual nulo, as variáveis mencionadas podem variar dentro de um intervalo específico, e o comprimento desse intervalo é denotado por $2\Delta FC_1, 2\Delta FC_2, \ldots, 2\Delta FC_t, 2\Delta i$. As médias desses intervalos são representadas por $\underline{FC_1}, \underline{FC_2}, \ldots, \underline{FC_t}, \underline{i}$. Levando em conta a fórmula 1 e as suposições, a equação para o valor presente líquido esperado é:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t} \tag{2}$$

As alterações no VPL podem ser demonstradas da seguinte maneira:

$$\Delta VPL = \left|\frac{\partial VPL(\underline{FC_1}, \underline{FC_2}, \ldots, \underline{FC_t}, \underline{i},\ I_0)}{\partial i}\right| \Delta i + \left|\frac{\partial VPL(\underline{FC_1}, \underline{FC_2}, \ldots, \underline{FC_t}, \underline{i},\ I_0)}{\partial FC_t}\right| \Delta FC_t \tag{3}$$

As derivadas parciais são equivalentes a:

$$\left|\frac{\partial VPL\left(\underline{FC_1}, \underline{FC_2}, \ldots, \underline{FC_t}, \underline{i}, I_0\right)}{\partial i}\right| = -\sum_{t=1}^{T} \frac{t\,\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^{t+1}}$$

$$\left|\frac{\partial VPL(\underline{FC_1}, \underline{FC_2}, \ldots, \underline{FC_t}, \underline{i}, I_0)}{\partial FC_t}\right| = \frac{1}{(1+\underline{i})^{t}}$$

Ao substituir as derivadas parciais na Expressão 3, a variação do VPL é equivalente a:

$$\Delta VPL = \sum_{t=1}^{T} \frac{t\,\underline{FC_t}}{\left(1+\underline{i}\right)^{t+1}} * \Delta i + \sum_{t=1}^{T} \frac{1}{(1+\underline{i})^{t}} \Delta FC_t \qquad (4)$$

A próxima etapa é determinar a sensibilidade do VPL, seja por meio das alterações nos fluxos de caixa ou pela variação na taxa de desconto. Na economia, isso é chamado de elasticidade, que é uma medida da sensibilidade de uma variável em relação a alterações em outro fator econômico (DUBONJIČ; MILANOVIČ, 2002; 2005). Se o coeficiente de elasticidade de uma variável for inferior a 1, isso indica que ela não é consideravelmente influenciada pelas alterações de outros fatores, ou seja, é inelástica. Se for superior a 1, indica que é elástica.

Sob a ótica da teoria da decisão, a elasticidade do VPL mede a variação percentual do indicador em resposta a alterações percentuais nos parâmetros de entrada. Quanto maior a elasticidade, maior a exposição do projeto àquela variável.

A variação da taxa de desconto i na Expressão 4 permite calcular o coeficiente de elasticidade do VPL, que é expresso da seguinte forma:

$$\Delta VPL_i = \sum_{t=1}^{T} \frac{t\ \underline{FC_t}}{\left(1+\underline{i}\right)^{t+1}} * \Delta i$$

$$\ni_i = \frac{\Delta VPL_i}{\Delta i} \frac{\underline{i}}{\underline{VPL}}$$

A elasticidade do VPL em relação às variações da taxa de desconto é calculada por meio da Expressão 2 e das fórmulas mencionadas acima.

$$\ni_i = \sum_{t=1}^{T} \frac{t\ \underline{FC_t}}{\left(1+\underline{i}\right)^{t+1}} \frac{\underline{i}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} \tag{5}$$

O coeficiente de elasticidade do VPL em relação a uma alteração nos fluxos de caixa pode ser determinado da seguinte maneira:

$$\Delta VPL_{FC_i} = \left(\frac{1}{(1+\underline{i})^t}\right) \Delta FC_t$$

$$\ni_{FC_t} = \left(\frac{\Delta VPL_{FC_i}}{\Delta FC_t}\right)\left(\frac{\underline{FC_t}}{\underline{VPL}}\right) = \frac{1}{(1+\underline{i})^t} \frac{\underline{FC_t}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} \tag{6}$$

A elasticidade do VPL pode ser determinada usando a Expressão 5 para uma alteração na taxa de desconto ou a Expressão 6 para uma mudança nos fluxos de caixa.

Método de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é um método computacional destinado à representação de incertezas por meio da criação de cenários baseados em probabilidade, sendo bastante empregada na análise financeira e na avaliação de riscos. Ao contrário dos métodos tradicionais de inferência estatística, seu objetivo principal não é testar hipóteses sobre parâmetros populacionais, mas sim investigar como um modelo matemático se comporta frente à variabilidade das variáveis de entrada. Essa diferenciação metodológica esclarece o motivo pelo qual a simulação não é organizada com base na estrutura convencional de testes de hipóteses.

A simulação funciona da seguinte forma: a partir de um modelo já estabelecido e distribuições de probabilidade designadas às variáveis incertas. A técnica envolve a criação de milhares de iterações aleatórias, resultando em uma distribuição empírica dos resultados viáveis. O objetivo é estimar a distribuição de um indicador (como VPL, TIR ou custo por hectare) em situações de incerteza modeladas matematicamente.

Na maioria das análises de investimento, os cálculos são baseados em valores determinísticos, considerando todas as variáveis como constantes conhecidas. Em vez de uma gama de valores que refletiria de forma mais precisa uma população ou condição, muitos desses valores são, na verdade, aproximações de uma condição média, desvio-padrão, limite superior ou limite inferior.

A incerteza é denominada avaliação de risco probabilística. Ela oferece informações que auxiliam os tomadores de decisão a compreender de forma mais eficaz os pontos fortes, os pontos fracos e os pressupostos subjacentes à avaliação de risco. A avaliação da incerteza produz uma distribuição dos perigos aos quais uma

população pode estar sujeita. Assim, os gestores de riscos podem utilizar essas informações para compreender de forma mais aprofundada as consequências das conclusões da avaliação de risco e tomar decisões sobre a gestão de resíduos perigosos que sejam cientificamente embasadas e economicamente viáveis.

A aplicação da simulação de Monte Carlo na análise de risco incorpora a análise dinâmica à avaliação de projetos, permitindo a criação de cenários aleatórios que se alinham com as principais suposições do analista em relação ao risco. Uma aplicação de análise de risco emprega uma vasta gama de informações, tanto dados objetivos quanto opiniões de especialistas, para descrever quantitativamente a incerteza relacionada às variáveis fundamentais do projeto, utilizando distribuições de probabilidade e calculando de maneira consistente o possível impacto no retorno esperado do projeto.

Uma análise de risco não gera um valor único, mas sim uma distribuição de probabilidade de todos os retornos possíveis esperados. Assim, o potencial investidor recebe um perfil completo de risco/retorno do projeto, apresentando todos os resultados possíveis decorrentes da decisão de investir seu dinheiro em um projeto específico.

Embora seja conceitualmente e algoritmicamente simples, o método exige a geração de muitas amostras aleatórias para atingir uma boa aproximação. Isso pode acarretar tempos elevados de execução, principalmente se o processamento de cada amostra for demorado (ARENAS *et al*., 2017).

O método de Monte Carlo compreende quatro etapas fundamentais (METROPOLIS; ULAM, 1949):

- Construção de um modelo preditivo, identificando variáveis dependentes e independentes (ou de risco);

- Definição da distribuição de probabilidade para cada variável independente, com base em dados históricos e/ou na experiência de especialistas;
- Geração de valores aleatórios para as variáveis independentes, repetindo-se o processo até obter uma amostra representativa das possíveis combinações;
- Agrupamento dos resultados, cálculo da média, desvio padrão e intervalo de confiança, seguido da visualização em histogramas.

Os dados obtidos pela simulação podem ser representados por distribuições de probabilidade ou convertidos em barras de erro, zonas de tolerância, intervalos de confiança e previsões de confiabilidade (VERGARA *et al*., 2021).

Na aplicação prática do método de Monte Carlo, são estimadas as receitas, os custos e as despesas de cada atividade operacional. O software Microsoft Excel é utilizado para desenvolver os algoritmos e executar os experimentos.

Mesmo com a elaboração otimista do modelo de referência, são considerados três cenários: otimista, mais provável e pessimista. Além disso, identificam-se riscos e incertezas que podem afetar as variáveis ao longo do tempo, como inflação, mudanças nas políticas comerciais, imigração e reformas regulatórias.

Para estimar o valor de uma variável, utiliza-se a seguinte fórmula: Prazo médio = (Otimista + (4 × Mais Provável) + Pessimista) ÷ 6.

O desvio padrão é calculado para se obter um intervalo de variação da variável dentro das suposições estabelecidas, evitando distorções. A fórmula é: Desvio padrão = (Pessimista – Otimista) ÷ 6.

Com base no valor médio e no desvio padrão de cada variável crítica, utilizou-se a distribuição normal para estimar o valor esperado do modelo de referência, levando em conta a produtividade e os imprevistos ao longo do processo.

A análise de risco não substitui a metodologia tradicional de avaliação de investimentos; em vez disso, ela serve como uma ferramenta que potencializa os resultados. Para criar uma simulação significativa, é preciso ter um bom modelo de avaliação. A análise de risco auxilia na tomada de decisões de investimento, fornecendo ao investidor uma medida da variabilidade relacionada à estimativa de retorno da avaliação do projeto.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A estrutura metodológica deste trabalho apresenta características de uma pesquisa de avaliação econômica, cujo objetivo é gerar conhecimento voltado à resolução de problemas definidos no projeto de pesquisa. Esse conhecimento visa embasar a aplicação prática futura, resultando em planos de ação, roteiros ou propostas de intervenção que poderão servir de base para uma pesquisa-ação subsequente (GIL, 2017; APPOLINÁRIO, 2011).

A abordagem adotada foi a pesquisa quantitativa, que, no contexto da Engenharia, permite a compreensão aprofundada de fundamentos e temas relacionados ao objeto de estudo, como organizações, ambiente de negócios e contexto competitivo. Essa vertente utiliza a literatura especializada como fonte de dados e aplica métodos sistemáticos de busca, análise crítica e síntese das informações coletadas (BERNARDES; MUNIZ JUNIOR; NAKANO, 2018).

A pesquisa seguiu uma estratégia descritiva, conforme descrito por Cauchick-Miguel (2019), que envolve a coleta de dados para descrever detalhadamente as características do objeto de estudo e estabelecer correlações entre variáveis associadas ao problema, visando aprofundar o entendimento dos aspectos epistemológicos envolvidos.

Conforme Severino (2018), foi adotado o método de pesquisa bibliográfica, considerado essencial para a produção de conhecimento científico relacionado ao problema investigado. As revisões sistemáticas da literatura, no âmbito da pesquisa quantitativa, possibilitaram maior compreensão sobre o objeto estudado, contribuindo para a formulação da solução proposta e direcionando a busca por artigos e conceitos correlacionados.

O desenvolvimento da pesquisa envolveu cinco etapas metodológicas principais:

1. Levantamento bibliográfico sobre temas pertinentes e coleta de dados técnicos sobre os equipamentos analisados;
2. Determinação dos investimentos, previsão de receitas com base na demanda estimada, estimativas de custos e despesas, e definição das fontes de financiamento e amortização;
3. Elaboração e aplicação do Fluxo de Caixa Líquido da empresa;
4. Cálculo de indicadores econômicos (VPL, TIR, Payback e IBC);
5. Aplicação da análise de sensibilidade;
6. Aplicação de números aleatórios e métodos estatísticos baseados em amostragem aleatória massiva para estimar variáveis controláveis em cenários incertos.

Quadro 1 – Premissas da simulação de Monte Carlo

Premissa	Descrição Conceitual	Aplicação na Análise de Investimento	Exemplo (Pulverização por Drones)
Definição do Modelo Econômico	Estrutura matemática que relaciona receitas, custos e indicadores financeiros	Modelo de VPL, TIR, B/C ou custo por hectare	Fluxo de caixa projetado para 5 anos
Identificação das Variáveis Críticas	Seleção das variáveis que apresentam incerteza relevante	Determinação dos fatores que impactam o resultado	Produtividade, custo de manutenção, eficiência de aplicação
Atribuição de Distribuições de Probabilidade	Definição do comportamento estatístico das variáveis	Representação realista da incerteza	Distribuição normal para preço e custo
Definição dos Parâmetros das Distribuições	Estabelecimento de valores mínimo, máximo, média ou desvio padrão	Baseado em dados históricos ou estimativas técnicas	Eficiência variando entre 85% e 95%
Número de Iterações	Quantidade de simulações realizadas	Quanto maior, maior estabilidade estatística	10.000 simulações
Critério de Convergência	Verificação da estabilidade dos resultados simulados	Monitoramento da média e desvio padrão dos indicadores	Estabilização do VPL médio
Indicadores de Saída	Métricas utilizadas para avaliar o investimento	Resultados analisados ao final da simulação	VPL, TIR, Payback, B/C
Análise Probabilística	Interpretação dos resultados em termos de risco	Probabilidade de viabilidade econômica	Probabilidade de VPL > 0
Avaliação de Cenários	Identificação de resultados em condições adversas ou favoráveis	Análise de risco	Identificação de cenário com impacto no retorno

Fonte: Elaboração própria.

Assim, o estudo foi conduzido com base em um conjunto de cinco etapas sequenciais e integradas, que fundamentaram a construção de um modelo referencial para avaliar a viabilidade econômica da pulverização por drones.

O Quadro 1 é apresentado com as principais premissas para a utilização da simulação de Monte Carlo na análise econômico-financeira da pulverização por drones.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estudo de Caso: Avaliação Econômico-Financeira do Uso de Drones Pulverizadores

O equipamento analisado foi o drone pulverizador DJI Agras T40, projetado para operações agrícolas de alta precisão. O modelo possui capacidade para 40 litros de calda líquida ou 50 kg de produtos sólidos, com largura operacional variando entre 6 e 11 metros em função da altura de voo e das condições de aplicação. O investimento inicial no equipamento principal foi estimado em R$ 160.000, incluindo os componentes essenciais para sua operação.

O conjunto operacional é composto por misturador de calda com capacidade de 150 litros, três baterias de alta capacidade com vida útil estimada em aproximadamente 1.500 ciclos de recarga, carregador inteligente com sistema de resfriamento, gerador de energia, treinamento especializado para operadores e sistema de distribuição de sólidos.

Considerando a necessidade de continuidade operacional e redução dos riscos associados à indisponibilidade dos equipamentos, foi incorporada uma infraestrutura complementar composta por um

segundo sistema de preparo de calda, computador para processamento de dados, drone de mapeamento equipado com sensores multiespectrais, carreta para transporte e um gerador adicional. Essa estratégia segue uma abordagem conservadora de gestão de ativos, frequentemente recomendada em operações intensivas em tecnologia, nas quais interrupções podem gerar perdas econômicas significativas.

O investimento total foi estruturado com 80% de recursos financiados e 20% de capital próprio. Para a amortização da dívida adotou-se o Sistema de Amortização Constante (SAC), amplamente utilizado em financiamentos de máquinas agrícolas devido à previsibilidade dos desembolsos e à redução gradual dos encargos financeiros ao longo do tempo.

A linha de crédito considerada foi o programa BNDES Moderfrota, destinado à modernização da frota agrícola, com taxa de juros anual de 11,5%, prazo total de sete anos e carência inicial de um ano e prazo total de 7 anos para quitação. O valor da amortização é fixado em R$ 18.285,71 por período, acrescido dos respectivos juros.

Um aspecto relevante da análise refere-se à rápida obsolescência tecnológica dos drones pulverizadores. Embora a estrutura financeira tenha sido modelada para sete anos, admitiu-se a necessidade de substituição periódica do equipamento principal a cada dois anos, refletindo a elevada intensidade de uso, o desgaste dos componentes eletrônicos e a constante evolução tecnológica do setor.

A estrutura financeira para o investimento em drones pulverizadores leva em conta um período de oito anos, com um ano de carência e reinvestimentos regulares para a substituição do equipamento. Os aportes de capital, que somam R$ 384.000,00, são feitos nos anos 0, 2 e 5, durante todo o período do projeto.

A amortização começa em R$ 18.285,71 nos anos 2 e 3 e, à medida que os anos passam, ela cresce até alcançar R$ 73.142,86 no ano 8. Esse comportamento denota o acúmulo de financiamentos resultantes das trocas regulares do drone, aumentando gradualmente o comprometimento financeiro da empresa. Os juros também crescem de forma significativa durante o período, indo de R$ 14.720,00 no primeiro ano a um máximo de R$ 39.954,29 no sétimo ano, antes de cair para R$ 33.645,71 no último ano.

Em decorrência, as parcelas anuais sobem de R$ 14.720,00 durante o período de carência para R$ 106.788,57 no último ano considerado. Esse crescimento é superior a 625% em comparação com o primeiro desembolso financeiro do projeto, o que demonstra como as renovações tecnológicas periódicas impactam fortemente o fluxo de caixa futuro.

Os resultados indicam que a viabilidade econômica do projeto está diretamente relacionada à capacidade operacional do drone em gerar receitas que equilibrem o aumento gradual das obrigações financeiras. Embora o período de carência alivie a pressão inicial sobre o caixa, a substituição frequente do equipamento aumenta consideravelmente os custos futuros.

a) **Estimativa das receitas**

A operação de pulverização agrícola com o drone pode gerar uma receita anual significativa. Com uma capacidade de operação de 23 hectares por hora e um total de 369,87 horas de trabalho anuais, além de nove pulverizações ao longo do ano, a área total operada chega a cerca de 8.544 hectares, resultando em uma receita bruta anual estimada em R$ 1.826.010,80.

Segundo os cenários simulados, o preço por hectare pulverizado é a variável mais influente na geração de receita. O levantamento apresenta preços que variam de R$ 130,00/ha (cenário pessimista) a R$ 200,00/ha (cenário otimista), sendo que o preço operacional é de R$ 149,60/ha. Essa variação evidencia a alta sensibilidade da rentabilidade em relação às condições de mercado e ao poder de precificação do serviço prestado.

A produtividade estimada é alta, cerca de 184,8 hectares por dia trabalhado (8.544 ha ÷ 46,23 dias), mostrando o quanto os drones podem tornar as operações mais eficientes em comparação aos métodos de aplicação tradicionais. A margem de lucro de 30% indica uma expectativa de retorno econômico robusta, contanto que os custos operacionais sejam mantidos sob controle.

Os Indicadores quantitativos mais relevantes foram:

- Receita bruta anual estimada: R$ 1.826.010,80.
- Área anual pulverizada: 8.544 hectares.
- Capacidade operacional: 23 ha/h.
- Horas trabalhadas por ano: 369,87 horas.
- Dias trabalhados por ano: 46,23 dias.
- Produtividade diária média: 184,8 ha/dia.
- Preço de referência do serviço: R$ 149,60/ha.
- Faixa simulada de preço: R$ 130,00/ha a R$ 200,00/ha.
- Margem de lucro considerada: 30%.

Os resultados apontam que o modelo de negócio tem um alto potencial de geração de receita, principalmente devido à alta

produtividade operacional e à vasta área coberta anualmente em hectares pulverizados. Sob a ótica da engenharia econômica, a manutenção da viabilidade do negócio depende essencialmente da continuidade da demanda por serviços de pulverização, da efetiva ocupação da capacidade operacional e da estabilidade dos preços cobrados por hectare. A análise mostra que pequenas alterações na precificação do serviço podem gerar impactos significativos na rentabilidade, o que torna a gestão comercial e a taxa de utilização do equipamento elementos essenciais para o sucesso econômico do investimento.

b) **Estrutura de custos**

Os custos operacionais foram estimados segundo os princípios do custeio variável, considerando apenas os gastos diretamente associados à execução das operações.

Entre os componentes mais relevantes destacam-se:

- consumo energético das baterias;
- combustível utilizado pelos geradores;
- manutenção preventiva e corretiva;
- mão de obra especializada;
- seguro operacional;
- custos de armazenagem e proteção dos equipamentos.

As baterias representam um elemento crítico da estrutura de custos, uma vez que sua vida útil é limitada por ciclos de recarga.

Com base em informações de mercado, estimou-se um custo operacional equivalente a R$ 6,00 por hectare pulverizado.

Os custos de manutenção foram estimados em R$ 18,18 por hectare, refletindo despesas com reposição de peças, inspeções técnicas e suporte especializado.

A mão de obra do piloto foi estimada em R$ 8.000 mensais, valor compatível com a crescente demanda por operadores certificados de drones agrícolas. Isso corresponde, aproximadamente, a R$ 33,33 por hora trabalhada.

O preço do combustível utilizado no gerador de energia para recarga das baterias foi mantido em R$ 6,40 por litro.

O gerador de energia Toyama 12,5 KVA a diesel consome cerca de 4 litros de combustível por hora, segundo especificações técnicas para motores de quatro tempos com aproximadamente 800 cilindradas. O consumo de lubrificante para esse tipo de motor foi estimado em 2% do volume de combustível utilizado.

Adicionalmente, assumiu-se valor residual nulo para o equipamento ao final de sua vida econômica, premissa conservadora que reflete a elevada depreciação tecnológica observada nesse segmento.

c) **Taxa mínima de atratividade**

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) adotada foi de 25% ao ano.

Sob a perspectiva da engenharia econômica, a escolha de uma TMA elevada é justificada pela presença simultânea de diversos fatores de risco, incluindo:

- variabilidade climática;
- volatilidade dos preços agrícolas;
- risco tecnológico;
- risco operacional;
- incertezas regulatórias;
- risco de mercado associado à demanda pelos serviços.

Dessa forma, a taxa utilizada procura refletir adequadamente o custo de oportunidade do capital e o prêmio de risco exigido pelo investidor.

A taxa de crescimento adotada para o setor agrícola foi de 12%, refletindo uma expectativa otimista baseada em tendências como modernização tecnológica, aumento da demanda por alimentos e expansão de práticas sustentáveis. Essa taxa considera a adoção de tecnologias como drones, pulverizadores de precisão e manejo integrado, que contribuem para o aumento da produtividade e redução de custos. Além disso, o crescimento populacional e políticas públicas voltadas ao setor impulsionam essa perspectiva.

A estrutura da Demonstração do Fluxo de Caixa (DFC) foi construída e é visualizada na Tabela 1, disposta na página seguinte. Na estimativa e análise dos principais indicadores econômico-financeiros, levamos em conta um investimento inicial de R$ 222.000,00. Os resultados demonstram um alto potencial de criação de valor econômico, visto que o Valor Presente Líquido (VPL) atingiu R$ 19.960.184,91, quantia que é cerca de 90 vezes maior que o investimento inicial, e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) simulada foi estabelecida em 24,78%.

O Valor Presente (VP) de R$ 20.182.184,91 é resultado de uma significativa capacidade de geração de fluxos de caixa

descontados durante todo o horizonte de análise. Isto é, um VPL positivo significa que o projeto devolve ao investidor o capital aplicado, mais um ganho econômico relevante.

Tabela 1 - Demonstração do Fluxo de Caixa pelo uso de drones (período 0 ao 5)

Descrição	Implantação	Fases/Anos Operação				
	0	1	2	3	4	5
A-Investimento fixo inicial	222.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A-Investimento fixo de substituições	-128.000,00	0,00	-128.000,00	0,00	-128.000,00	0,00
B-Capital de giro						
(=) C-Receita operacional		9.462.618,23	10.598.132,41	11.869.908,30	13.294.297,30	14.889.612,97
(-) D-Custo operacional (-depr.)		-896.087,18	-896.087,18	-896.087,18	-896.087,18	-896.087,18
(=) E-Lucro operacional (C-D)		8.566.531,05	9.702.045,24	10.973.821,13	12.398.210,12	13.993.525,80
(-) F-Depreciação		-386.877,17	-386.877,17	-386.877,17	-386.877,17	-386.877,17
(-) G-Encargos financeiros (juros de financiamento - JOF)		-20.424,00	-20.424,00	-17.506,29	-14.588,57	-11.670,86
(-) G-Encargos financeiros (JOF de substituições)		14.720,00	14.720,00	27.337,14	25.234,29	35.748,57
(=) H-Lucro antes do IR (E-F-G)		8.173.949,88	9.309.464,06	10.596.774,81	12.021.978,66	13.630.726,34
(-) I-Imposto de Renda (f2*H)		-1.266.962,23	-1.442.966,93	-1.642.500,10	-1.863.406,69	-2.112.762,58
(-) I-Contribuição Social (f1*H)		-743.012,04	-846.230,28	-963.246,83	-1.092.797,86	-1.239.033,02
(-) I-IR ad. Estadual (f3*J)		-408.697,49	-465.473,20	-529.838,74	-601.098,93	-681.536,32
(=) LUCRO LÍQUIDO		5.755.278,11	6.554.793,65	7.461.189,14	8.464.675,18	9.597.394,41
(+) Depreciação		386.877,17	386.877,17	386.877,17	386.877,17	386.877,17
(-) Amortização de financiamento		0,00	-25.371,43	-25.371,43	-25.371,43	-25.371,43
(-) Amortização de outros financiamentos		0,00	14.720,00	14.720,00	27.337,14	25.234,29
(+) Valor Residual						
Saldo do Fluxo de Caixa	-222.000,00	6.142.155,28	6.931.019,39	7.837.414,89	8.853.518,06	9.984.134,45
FLUXO DE CAIXA LÍQUIDO NO PERÍODO	**-222.000,00**	**6.142.155,28**	**6.803.019,39**	**7.837.414,89**	**8.725.518,06**	**9.984.134,45**

Fonte: Elaboração própria.

A TIR de 2.771,77% é muito superior à TMA de 24,78%, indicando que o investimento é financeiramente muito atrativo. Além disso, o Índice Benefício-Custo (IBC) de 176,69% demonstra que os benefícios econômicos superam amplamente os custos do projeto. Com um payback descontado de apenas 16 dias, a recuperação do capital investido é extremamente rápida, o que diminui significativamente a exposição ao risco financeiro.

Apesar dos resultados apontarem uma viabilidade econômica excelente, alguns indicadores precisam ser analisados com cuidado. Um VPL estratosfericamente alto, uma TIR acima de 2.700% e um payback de menos de um mês indicam que as premissas sobre a pulverização, o preço do serviço, a demanda crescente ou a estrutura de custos podem ser excessivamente otimistas. Resultados dessa magnitude em engenharia econômica normalmente exigem

validação adicional por meio de análises de sensibilidade, cenários extremos e simulações probabilísticas.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E ELASTICIDADE DO VPL

Para começar, um estudo de sensibilidade sólido definimos um indicador econômico que reflita a viabilidade do investimento, como o Valor Presente Líquido (VPL). Na sequência, as variáveis que estão sujeitas à incerteza são identificadas, e para cada uma delas são definidos valores de referência, bem como limites mínimos e máximos. Em seguida, o indicador escolhido é recalculado levando em conta as mudanças desses elementos, o que possibilita a análise de seus efeitos individuais. As expressões 5 e 6 podem ser usadas para calcular a elasticidade do valor presente líquido em relação a uma alteração em um fluxo de caixa. Notamos que o investimento inicial (I_0) do projeto é de R$ 220.000. A elasticidade é analisada da seguinte maneira (A $\ni_X$ quer dizer que o conjunto A contém X):

$$\ni_i = \sum_{t=1}^{T} \frac{t\,\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^{t+1}} * \frac{\underline{i}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} = 0{,}22$$

$$\ni_{FC_1} = \frac{1}{(1+\underline{i})^1} \frac{\underline{FC_1}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} = 0{,}09$$

$$\ni_{FC_2} = \frac{1}{(1+\underline{i})^2} \frac{\underline{FC_2}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} = 0{,}13$$

$$\ni_{FC_3} = \frac{1}{(1+\underline{i})^3} \frac{\underline{FC_3}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} 0.18$$

...

$$\ni_{FC_5} = \frac{1}{(1+\underline{i})^5} \frac{\underline{FC_5}}{-I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\underline{FC_t}}{(1+\underline{i})^t}} 0{,}35$$

Em nenhum cenário do fluxo de caixa o valor presente líquido é sensível, uma vez que o coeficiente de elasticidade não ultrapassa 1. Isso é compreensível, considerando que os valores derivados do fluxo de caixa do projeto são crescentes e que todos os resultados superam o investimento inicial. Outro aspecto relevante a ser considerado é a probabilidade de o VPL exceder um valor específico. Por exemplo, vamos calcular a probabilidade de P ser maior ou igual a 1.500.000.

A equação 2 pode ser usada para calcular o valor presente líquido, E(VPL) = 5.665.216,03. A próxima etapa envolve o cálculo da variação do VPL, empregando a equação 4.

$$\Delta VPL = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + + \Delta_4 + + \Delta_5 + \Delta_i$$

Onde,

$$\Delta_1 = \left|\frac{1}{(1+\underline{i})^1}\right| \Delta FC_1 = \left|\frac{1}{(1+0{,}325)^1}\right| * 227.409 = 171.629{,}66$$

$$\Delta_2 = \left|\frac{1}{(1+\underline{i})^2}\right| \Delta FC_2 = \left|\frac{1}{(1+0{,}325)^2}\right| * 325.331 = 185.307{,}85$$

$$\Delta_3 = \left|\frac{1}{(1+\underline{i})^3}\right| \Delta FC_3 = \left|\frac{1}{(1+0{,}325)^3}\right| * 592.967 = 254.907{,}54$$

...

$$\Delta_3 = \left|\frac{1}{(1+\underline{i})^5}\right| \Delta FC_3 = \left|\frac{1}{(1+0{,}325)^5}\right| * 1.949.756 = 477.420{,}18$$

$$\Delta_i = \left| \frac{FC_1}{(1+\underline{i})^2} + \frac{2FC_2}{(1+\underline{i})^3} + \frac{3FC_3}{(1+\underline{i})^4} + \frac{4FC_4}{(1+\underline{i})^5} + \frac{5FC_5}{(1+\underline{i})^6} \right| \Delta i =$$

$$\Delta_i = \left| \frac{706.282}{(1+0{,}325)^2} + 2 * \frac{1.258.544}{(1+0{,}325)^3} + \cdots + 5 * \frac{8.186.826}{(1+0{,}325)^6} \right| (0{,}03)$$

$$= 2.836.013{,}32$$

O desvio padrão é uma medida estatística que quantifica a dispersão ou a variabilidade de um conjunto de dados em relação à média, e é estimado da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{171.629{,}66 + 185.307{,}85 + 254.907{,}54 + \cdots + 2.836.013{,}32}{5}$$

$$= 1.149.286{,}13$$

Caso o valor presente líquido (VPL) siga uma distribuição normal, é possível utilizar a função de distribuição acumulada:

$$P(VPL \leq 1.500.000) = F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} exp\left(\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt$$

$$= 0{,}00014$$

Assim, a chance de o VPL ser igual ou maior que 1.500.000 é de:

$$P(VPL \geq 1.500.000) = 1 - 0{,}00014 = 0{,}99986.$$

Contudo, pode haver incerteza quanto à distribuição do VPL. Nesse contexto, pode-se empregar a desigualdade de Chebyshev, um

resultado essencial da teoria da medida, com amplas aplicações na teoria da probabilidade. Essa desigualdade tem sido objeto de estudo em várias áreas da ciência ao longo de mais de um século (STELLATO; PARYS; GOULART, 2017). A versão mais frequente desse resultado indica que, para uma vasta classe de distribuições de probabilidade, uma medida de concentração de uma variável aleatória tende a ser semelhante à sua média e variância.

$$P(|X - \mu| \geq k\sigma) \leq \frac{1}{k^2}$$

Se substituímos $k\sigma$com Δ, onde $k = \Delta/\sigma$, a desigualdade de Chebyshev teria a seguinte formato:

$$P(|X - \mu| \gg \Delta) \leq \frac{\sigma^2}{\Delta^2}$$

Onde $\Delta = VPL(i) - 1.500.000 = 5.665.216{,}03 - 1.500.000 = 4.165.216{,}03$; $\left(\frac{\sigma}{\Delta}\right)^2 = 0{,}08$.

A probabilidade seria,

$$P(VPL \geq 1.500.000) = 1 - \frac{0{,}08}{2} \approx 0{,}96$$

Depois de calcular a elasticidade do valor presente líquido em relação a alterações nos fluxos de caixa ou na taxa de desconto, o passo seguinte é determinar como os diversos parâmetros de entrada do projeto podem influenciar o resultado previsto. A análise

de sensibilidade, representada pelo gráfico da teia de aranha, é uma técnica bastante empregada para avaliar o efeito econômico de um projeto de investimento ao alterar uma das variáveis de entrada do modelo (PURUSHOTHAM; THANUJA, 2025). A análise desses efeitos pode auxiliar uma empresa a identificar quais entradas do modelo geram a maior alteração na economia do projeto.

Os resultados demonstraram que nenhuma das elasticidades calculadas ultrapassou a unidade, indicando que pequenas variações nos fluxos de caixa não provocam alterações proporcionalmente superiores no VPL. Isso sugere relativa robustez econômica do empreendimento diante de oscilações moderadas nas receitas projetadas.

Contudo, é importante destacar que a interpretação isolada da elasticidade apresenta limitações. Um projeto pode apresentar baixa elasticidade local e, ainda assim, ser altamente vulnerável quando submetido a mudanças simultâneas em múltiplas variáveis, situação frequentemente observada em sistemas agrícolas.

Algumas limitações metodológicas merecem atenção. Primeiramente, a hipótese de normalidade do VPL raramente é observada em projetos agroindustriais, cujos fluxos de caixa costumam apresentar assimetria e caudas longas. Dessa forma, a utilização direta da distribuição normal pode gerar estimativas excessivamente otimistas.

Além disso, o cálculo do desvio-padrão foi realizado por aproximação, utilizando variações individuais dos componentes do modelo. Estatisticamente, essa abordagem não captura adequadamente as correlações existentes entre as variáveis econômicas.

A aplicação da desigualdade de Chebyshev representa uma alternativa mais conservadora, pois independe da forma da distribuição. Todavia, seus limites probabilísticos tendem a ser

excessivamente amplos, produzindo estimativas pouco precisas para tomada de decisão.

O gráfico de teia de aranha pode ser usado para identificar os fatores mais relevantes que impactam o projeto, por meio de uma representação visual intuitiva em formato de estrela, minimizando assim os riscos envolvidos. Por exemplo, se o custo do produto se mostrar um elemento decisivo, o investidor deve considerar aprimorar as estratégias de marketing ou a qualidade do produto. Se o projeto for afetado por uma alteração na quantidade de produção, é necessário implementar medidas para aumentar a produtividade.

O gráfico de linhas é usado para mostrar e comparar várias variáveis e suas tendências ao longo do tempo na mesma escala, permitindo identificar os pontos fortes e fracos de uma categoria quando a ordem é relevante. Por fim, se os custos dos materiais forem essenciais para o projeto, a administração deve aprimorar a relação com os fornecedores, firmar contratos de longo prazo e pedir um desconto nos materiais (HUIKKU, KARJALAINEN, SEPPÄLÄ, 2025).

Foram testadas três variáveis essenciais do projeto, com a análise de sensibilidade do Valor Presente Líquido (VPL) em relação ao preço de venda do serviço (Preço T.), custos fixos (CF) e custos variáveis (CV), avaliando variações de -20% a +20%, de modo a verificar a resiliência econômica do investimento em cenários desfavoráveis e favoráveis.

Os resultados apontam que o preço de venda por hectare é a variável que mais impacta o VPL. Uma alta de 20% resulta em valores próximos a R$ 10 milhões para o indicador, enquanto uma queda de -20% faz com que o indicador atinja R$ 6.000.000 milhões. Os custos variáveis, por outro lado, têm um impacto negativo moderado, fazendo com que o VPL diminua gradualmente à medida que eles aumentam. Os custos fixos têm um impacto que se mostra

pequeno, o que indica que o projeto é menos sensível a mudanças nessa categoria de despesa.

Os Indicadores quantitativos estimados foram:

- Faixa de variação analisada: ±20%.
- VPL mínimo observado: aproximadamente R$ 6 milhões.
- VPL máximo observado: aproximadamente R$ 10 milhões.
- Amplitude do VPL: cerca de R$ 4 milhões.
- Maior sensibilidade: preço de venda do serviço.
- Sensibilidade intermediária: custos variáveis.
- Menor sensibilidade: custos fixos.

A análise revela que o sucesso econômico do negócio está fortemente ligado à sua habilidade de manter preços competitivos e de extrair valor no setor de pulverização agrícola. A forma das curvas indica que o projeto é mais sensível às variáveis de receita do que às de despesa operacional. Sob a ótica da engenharia econômica, isso implica que a estratégia comercial, a gestão da demanda e o posicionamento de mercado provavelmente terão um impacto maior no retorno sobre o investimento do que qualquer esforço exclusivo para cortar custos. O preço de venda é, portanto, o principal motor de criação de valor no projeto e os custos fixos, uma fonte de risco econômico bastante limitada.

A simulação de Monte Carlo foi utilizada para incorporar explicitamente as incertezas presentes no projeto. Na simulação foram criados cinco cenários possíveis com base nos hectares a serem pulverizados. Para cada cenário, considerou-se a variável

dependente em três modalidades: pessimista, mais provável e otimista.

O primeiro cenário considerou 120 hectares como valor pessimista, 480 hectares como mais provável e 720 hectares como otimista. O segundo cenário variou entre 700 e 900 hectares, representando uma faixa comum de tamanho das propriedades rurais brasileiras na produção de grãos. No terceiro cenário, foram utilizados 1.000 hectares como valor pessimista, 1.500 como mais provável e 2.000 como otimista. O cenário quatro adotou 2.000 hectares como valor pessimista, 3.000 como mais provável e 4.000 como otimista. Por fim, o quinto cenário variou entre 4.000 hectares (pessimista), 5.000 (mais provável) e 6.000 (otimista).

Como variáveis independentes — também chamadas de variáveis de entrada, preditoras ou de risco — utilizaram-se: consumo de combustível (R$/ha), valor de aplicação por hectare (R$/ha), custo de manutenção (R$/h/metro) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). No caso, do número de hectares a trabalhar foi considerado como variável dependente.

Na análise, o custo de manutenção não foi considerado variável independente, já que, no caso do drone, essa despesa é relativamente inexpressiva. Além disso, a substituição do equipamento é mais compensatória ao invés de reparos.

A simulação foi executada com 5.000 eventos aleatórios. Esse número elevado de amostras permite capturar uma ampla gama de resultados possíveis, garantindo robustez estatística e confiabilidade. Os eventos simulam a variabilidade real em aspectos como área trabalhada, receitas e custos, permitindo identificar riscos operacionais e compreender o impacto da incerteza sobre o desempenho econômico.

Os resultados indicam uma grande estabilidade financeira entre os cenários analisados, visto que as oscilações nos indicadores

são bem pequenas. A TMA simulada se manteve em 24,78% ao ano, enquanto a TMA média nos diversos cenários foi de 25,83% ao ano, proporcionando uma base consistente para comparar os retornos dos investimentos.

O Valor Presente (VP) cresceu de forma gradual do cenário 1 (R$ 4.659.032,72) até o cenário 3 (R$ 4.665.476,97) e, em seguida, reduziu nos cenários 4 e 5, chegando a R$ 4.634.812,86. O Valor Presente Líquido (VPL) apresentou um comportamento análogo, atingindo seu ponto alto no cenário 3 (R$ 4.922.988,45) e o mais baixo no cenário 5 (R$ 4.888.455,55). O maior e o menor VPL apresentaram uma diferença de apenas R$ 34.532,90, o que representa cerca de 0,70%, evidenciando que o projeto é pouco sensível às alterações simuladas.

A TIR continuou em patamares extremamente altos, entre 617,65% e 620,45% ao ano, muito acima da TMA aplicada. De maneira similar, o Índice Benefício-Custo (IBC) se manteve quase inalterado, variando entre 157,93% e 158,04%, o que demonstra que os benefícios econômicos do projeto superam em muito os custos. O payback foi de apenas 15 a 16 dias em todos os cenários, evidenciando que o investimento inicial se recupera rapidamente.

Os Indicadores quantitativos mais relevantes foram:

- TMA simulada: 24,78% a.a.
- TMA média: 25,83% a.a.
- Maior VP: R$ 4.665.476,97 (cenário 3).
- Menor VP: R$ 4.634.812,86 (cenário 5).
- Maior VPL: R$ 4.922.988,45 (cenário 3).
- Menor VPL: R$ 4.888.455,55 (cenário 5).
- Variação máxima do VPL: R$ 34.532,90 (0,70%).

- TIR média aproximada: 619,08% a.a.
- IBC médio: 157,99%.
- Payback: entre 15 e 16 dias.

Os resultados apontam que o cenário 3 é o ponto de máxima eficiência econômica do projeto, pois traz os maiores VP, VPL e TIR. A baixa dispersão dos indicadores entre os cenários indica uma significativa robustez financeira e uma baixa sensibilidade às mudanças nas premissas da simulação. Quando analisado sob a ótica da engenharia econômica, o investimento possui grande potencial de geração de valor, alta rentabilidade e recuperação rápida do capital investido. Entretanto, quando se depara com métricas extraordinárias, como uma TIR acima de 600% ao ano e um payback de menos de um mês, é aconselhável validar ainda mais as premissas operacionais e de mercado utilizadas para garantir que os resultados sejam sólidos e que a rentabilidade do negócio não esteja sendo exagerada.

O Valor Presente Líquido do drone pulverizador apresenta melhor desempenho do cenário 1 até o cenário 3, sendo este último o mais atrativo. Os ganhos estimados nesses cenários são mais confiáveis e apresentam menor risco de investimento. O declínio observado nos cenários 4 e 5 ocorre devido à baixa probabilidade de pulverização acima de 950 hectares, conforme demonstrado na frequência relativa dos hectares trabalhados.

Sob a perspectiva da engenharia econômica e da gestão da produção, os resultados sugerem que a viabilidade financeira do drone pulverizador depende fortemente da taxa de utilização do ativo.

O investimento apresenta elevado potencial de geração de valor quando a capacidade operacional é adequadamente utilizada.

Entretanto, a rentabilidade é sensível à ocupação da frota, característica típica de ativos de alta intensidade tecnológica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de projetos de investimento em ambientes de incerteza exige abordagens que ultrapassem os métodos determinísticos tradicionais. Embora indicadores como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) sejam amplamente utilizados, sua aplicação isolada pode limitar a compreensão dos riscos associados às variáveis econômicas e operacionais do projeto.

Neste contexto, o estudo propõe uma abordagem integrada baseada em análise de sensibilidade e simulação de Monte Carlo para incorporar explicitamente a incerteza ao processo de avaliação econômico-financeira. Os resultados demonstram que a modelagem probabilística das variáveis críticas fornece uma representação mais realista do comportamento do investimento, permitindo estimar não apenas a rentabilidade esperada, mas também a distribuição dos possíveis resultados e seus respectivos riscos.

A análise de sensibilidade mostrou-se relevante para identificar as variáveis com maior influência sobre a viabilidade econômica do projeto. Os resultados indicaram que o preço de venda exerce o maior impacto positivo sobre o VPL, enquanto os custos fixos e variáveis representam os principais fatores de redução da rentabilidade. Essas evidências reforçam a importância do controle de custos e da definição adequada das estratégias de precificação para a sustentabilidade econômica do investimento.

Complementarmente, a simulação de Monte Carlo permitiu avaliar de forma conjunta as incertezas associadas às variáveis de

entrada, superando as limitações da análise de sensibilidade unidirecional. Os resultados indicaram que o cenário com aproximadamente 950 hectares pulverizados apresentou maior estabilidade estatística e melhor equilíbrio entre retorno esperado e risco, configurando-se como o cenário mais provável para a operação analisada.

Apesar dos resultados favoráveis, o estudo apresenta limitações que devem ser consideradas. Os parâmetros utilizados foram obtidos a partir de uma amostra reduzida de prestadores de serviços e entrevistas informais, o que pode restringir a representatividade dos dados. Adicionalmente, a elevada sensibilidade dos resultados à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e a ausência de validação externa do modelo limitam a generalização das conclusões para diferentes contextos operacionais.

Também, o estudo não incorpora riscos regulatórios, mudanças tecnológicas futuras, sazonalidade da demanda, falhas operacionais complexas nem possíveis correlações entre preços agrícolas, área atendida e custos de operação. Essas limitações sugerem que os resultados devem ser interpretados como uma aproximação estruturada da realidade e não como uma previsão determinística do desempenho econômico do investimento.

De qualquer forma, as evidências indicam que a utilização de drones pulverizadores pode constituir uma alternativa economicamente atrativa, desde que exista escala operacional suficiente para diluir os elevados custos de capital e garantir níveis consistentes de utilização ao longo da vida útil do projeto.

Como agenda de pesquisa futura, recomenda-se a ampliação do modelo mediante a incorporação de variáveis técnicas, agronômicas e econômico-financeiras adicionais, bem como a utilização de bases de dados mais robustas e validação em diferentes realidades produtivas. A integração entre desempenho operacional,

eficiência agronômica e retorno financeiro poderá contribuir para o desenvolvimento de modelos mais abrangentes e confiáveis para a análise de investimentos em tecnologias agrícolas de precisão.

REFERÊNCIAS

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência**: filosofia e prática da pesquisa. São Paulo: Editora Cengage do Brasil, 2011.

ARENAS, D. J. *et al*. "A Monte Carlo simulation approach for estimating the health and economic impact of interventions provided at a student-run clinic". **Revista Plos One**, vol. 12, n. 12, 2017.

BERNARDES, E.; MUNIZ JUNIOR, J.; NAKANO, D. **Pesquisa qualitativa em engenharia de produção e gestão de operações**. São Paulo: Editora Atlas, 2018.

BRESTERS, C. J. **Modelling the financial feasibility of a new business model**: Sustainability measures "as-a-Service". Amsterdam: University of Twente, 2021.

CASALI, A. L. **Caracterização, avaliação e classificação dos pulverizadores autopropelidos produzidos no brasil** (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola). Santa Maria: UFSM, 2015.

CAUCHICK-MIGUEL, P. A. **Metodologia científica para engenharia**. Amsterdã: Elsevier, 2019.

DUBONJIČ, R.; MILANOVIČ, D. L. "Complementarities of sensitive and critical analysis methods in evaluation of investment projects in the process industry". **Procesna Tehnika**, n. 1, 2002.

DUBONJIČ, R.; MILANOVIČ, D. L. **Engineering Economy**. Kruševac: ICIM, 2005.

DWIVEDI, D. N.; MAHESHWARI, S. N.; BHATIA, H. L. **Engineering economics text and cases**. New: Delhi Vikas Publishing House, 2025.

ESTUDOS ESPECIAIS DO BANCO CENTRAL. "Sensibilidade da demanda à taxa de juros e poder de mercado em modalidades de crédito pessoal com recursos livres". **Estudo Especial do Banco Central**, n. 90, 2020.

FARR, J. V.; FABER, I. J. **Engineering Economics of Life Cycle Cost Analysis**. Florida: CRC Press, 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2017.

HUIKKU, J.; KARJALAINEN, J.; SEPPÄLÄ, T. "Strategic factors and the use of risk analysis techniques in strategic investment decisions". **Accounting and Business Research**, vol. 56, 2025.

HUNT, E. R.; DAUGHTRY, C. S. T. "What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture?" **International Journal of Remote Sensing**, vol. 39, n. 15, 2018.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. "The Monte Carlo Method". **Journal of the American Statistical Association**, vol. 44, n. 247, 1949.

MONTE, D. M. F. M.; MOURA, D. A. P.; SANTOS, M. "Abordagem prática do método híbrido CRITIC-CoCoSo para seleção de um drone pulverizador de defensivos agrícolas em

diversas culturas". **Anais do LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. São José dos Campos: USP, 2023.

PARLANGELI GONÇALVES, V.; CAVICHIOLI, A. F. "Estudo das funcionalidades dos drones na agricultura". **Revista Interface Tecnológica**, vol. 18, n. 1, 2021.

PURUSHOTHAM, C. J.; THANUJA, T. S. "Risk Management in Capital Budgeting: A Study of Scenario and Sensitivity Analysis". **International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology**, vol. 14, n. 9, 2025.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Editora Cortez, 2018.

SISHODIA, R. P.; RAY, R. L.; SINGH, S. K. "Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture". **A Review: Remote Sensing**, vol. 12, n. 19, 2020.

STELLATO, B. PARYS, B.; GOULART, P. "Multivariate Chebyshev Inequality with Estimated Mean and Variance". **USA: The American Statistician**, vol. 71, 2017.

VERGARA, W. R. H. *et al*. "Agricultura familiar: viabilidade econômico-financeira na produção de morangos e manjericões". **Revista EXACTA**, vol. 19, 2021.

VERGARA, W. R. H.; CRUZ, R. F. "Análise de risco na viabilidade econômico-financeira de pulverizadores". **Revista Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 24, n. 70, 2025a.

VERGARA, W. R. H.; CRUZ, R. F. "Viabilidade econômico-financeira de pulverizadores: autopropelido e drones". **Revista Sitio Novo**, vol. 9, 2025b.