

**Viabilidade de Sistemas Agrovoltáicos na Agricultura Familiar do
Paraná pelo Método de Monte Carlo**

*Feasibility of Agrivoltaic Systems in Family Farming in Paraná
using the Monte Carlo Method*

Henri Claude Machado de Farias

Doutorando Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas da
Universidade Estadual de Maringá (PCE/UEM), Maringá, Paraná (PR), Brasil

Ednaldo Michellon

Professor Associado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas da
Universidade Estadual de Maringá (PCE/UEM), Maringá, Paraná (PR), Brasil

GT4. Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

Resumo

O êxodo rural causado pela crescente pressão sobre a renda do agricultor familiar e a necessidade de aproveitar melhor o grande potencial de geração fotovoltaica no Brasil motivam a investigação de alternativas produtivas complementares à atividade agrícola. Este estudo examina a viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas agrovoltáicos (AVS) no Estado do Paraná, modelo que permite a coexistência da produção de alimentos com a geração de energia limpa e renovável, adicionando uma fonte de renda extra ao agricultor familiar, o que contribui para melhorar a qualidade de vida e a permanência no campo. A pesquisa fundamentou-se na análise geoespacial solarimétrica e na Simulação de Monte Carlo para avaliar a viabilidade econômica do projeto. Os resultados confirmaram que as regiões norte, oeste e central do Paraná apresentam índices de irradiação (IPI) favoráveis à implantação do sistema. A simulação demonstrou viabilidade econômica, com renda mensal média estimada em R\$ 1.355,00 e intervalo de percentis de 90% do valor estar entre R\$ 1.096,00 e R\$ 1.613,00, sob hipóteses conservadoras. O projeto é economicamente viável para o pequeno produtor rural e apresenta potencial de expansão para outros estados, podendo servir de base para políticas públicas de fomento à geração distribuída fotovoltaica e contribuir para a redução no êxodo rural.

Palavras-chave: viabilidade econômica, energia solar fotovoltaica, microclima, êxodo rural

Abstract

Rural exodus caused by increasing pressure on family farmers' income and the need to better utilize Brazil's great photovoltaic generation potential motivate the investigation of productive alternatives complementary to agricultural activity. This study examines the technical and economic feasibility of implementing agrivoltaic systems (AVS) in the State of Paraná, a model that allows the coexistence of food production with the generation of clean and renewable energy, adding an extra source of income for family farmers, which contributes to improving their quality of life and their continued presence in rural areas. The research was based on solarimetric geospatial analysis and Monte Carlo simulation to assess the economic viability of the project. The results confirmed that the northern, western, and central regions of Paraná have irradiance indices (IPI) favorable to the implementation of the system. The simulation demonstrated economic viability, with an estimated average monthly income of R\$ 1,355.00 and the 90th percentile range falling between R\$ 1,096.00 and R\$ 1,613.00, under conservative assumptions. The project is economically viable for small rural producers and has the potential for expansion to other states, serving as a basis for public policies to promote distributed photovoltaic generation and contributing to the reduction of rural exodus.

Key words: economic feasibility, photovoltaic solar energy, microclimate, rural exodus.

1. Introdução

O Relatório de Avaliação do IPCC (2023) declara que o aquecimento global já atingiu 1,1 °C acima dos níveis pré-industriais e prevê que mantendo o cenário atual de emissões, a barreira de 1,5 °C deverá ser ultrapassada entre 2021 e 2040, intensificando eventos extremos como secas prolongadas e enchentes volumosas especialmente nas regiões tropicais.

Uma das ações mais bem-sucedidas no sentido de mitigar os efeitos das mudanças climáticas é o esforço de transição energética, com a redução do uso de combustíveis fósseis e sua progressiva substituição por fontes limpas e renováveis, como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica. A transição energética é uma das razões que motivou este estudo e a outra razão, muito relevante na realidade brasileira atual, é a necessidade de combater o êxodo rural no Paraná, ampliando a renda do pequeno agricultor familiar sem comprometer a produção de alimentos.

A busca por meios de manter o campo com gente passa pela capacidade de agregar renda à atividade agrícola desses agricultores familiares. O abandono das áreas rurais e a migração para as periferias das grandes cidades é motivada, principalmente, pela baixa rentabilidade das pequenas propriedades familiares, que muitas vezes não dispõem de tecnologia e nem financiamento para prover para as famílias do campo uma produção agrícola que gere renda suficiente para fixá-los na zona rural.

A hipótese central desta pesquisa é que o modelo de implantação de sistemas agrovoltáticos (AVS), baseado na instalação de painéis solares em propriedades familiares da zona rural no Paraná, não em substituição a produção de alimentos, mas como complemento da lavoura, pode mitigar ambos os problemas mencionados, ou seja, diminuir o êxodo rural por meio de uma fonte de renda complementar para os agricultores além de fornecer energia elétrica limpa e renovável para o conjunto da sociedade.

Ao combinar produção agropecuária e geração fotovoltaica na mesma área, o modelo agrovoltático viabiliza o uso mais eficiente do solo sem sacrificar a atividade agrícola pela infraestrutura energética, proporcionando uso mais eficiente da terra, pois, ao mesmo tempo, em que mantém a produção de alimentos como atividade principal dos agricultores também permite uma renda complementar proveniente da geração de eletricidade.

Apesar de o assunto ser objeto de várias pesquisas europeias, o tema ainda é pouco discutido no Brasil. Na Europa, as pesquisas focam na produtividade agrícola e no impacto que a sombra produzida pelos painéis solares pode ter sobre leguminosas e outras culturas, que pode ser positiva ou negativa dependendo de análise caso a caso. No entanto, no Brasil, as pesquisas nesse sentido ainda são poucas e focadas em aspectos relacionados à geração de eletricidade e

não trazem a hipótese de o sistema funcionar como uma fonte de renda para a agricultura familiar.

O objetivo da pesquisa é avaliar a viabilidade econômica de sistemas agrovoltaicos no estado do Paraná, por meio da estimação estocástica do Valor Presente Líquido (VPL), da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do Retorno sobre o Investimento (ROI) mediante a simulação de Monte Carlo. Para atingir este objetivo, a pesquisa segue dois caminhos, o primeiro examina o estado do Paraná, buscando definir regiões com maior irradiação solar, além de conhecer a disposição e o número dos agricultores familiares no estado. O segundo caminho, e mais relevante, estuda a viabilidade econômico-financeira deste sistema utilizando um método estocástico consagrado no ambiente acadêmico, o qual é o método da simulação de Monte Carlo utilizando o software R.

O estudo é composto de quatro seções, além da introdução. Na seção 2 é apresentado o referencial teórico que embasa o estado da arte sobre sistemas agrovoltaicos. Os parâmetros da simulação e demais procedimentos metodológicos são detalhados na seção 3, como a estrutura da simulação de Monte Carlo. Os resultados obtidos com o mapeamento solar e a modelagem estocástica da distribuição dos valores de VPL, TIR, Payback e ROI são apresentados na seção 4. A conclusão da pesquisa é apresentada na seção 5, apontando as limitações do estudo e sugerindo caminhos abertos para pesquisas futuras.

2. Revisão da Literatura

A revisão teórica fundamentou-se inicialmente no artigo de Krishnamurthy et al. (2021) que avalia que o aumento da demanda energética nos Estados Unidos exigirá que o país expanda em até 27% as terras utilizadas para esse fim até 2040, aumentando assim a competição entre produção agrícola e infraestrutura de energia. Até recentemente, terras no país eram arrendadas para extração de petróleo e gás por meio do *fracking*, mas os autores concluem ao final da pesquisa que os sistemas agrovoltaicos podem oferecer aos agricultores uma alternativa de renda previsível e sem os riscos de contaminação inerentes da exploração de óleo e ainda melhorar a eficiência híbrida e a produtividade de certas culturas.

A análise da influência dos sistemas agrovoltaicos (AVS) na agropecuária é fundamentada em três artigos, iniciando pela pesquisa de Widmer et al. (2024) que revisa o conhecimento sobre sistemas agrovoltaicos, avaliando o impacto na produção e no bem-estar animal em 54 artigos científicos baseados em experimentos práticos na zona rural. O estudo conclui que o sucesso de colheitas em regiões com AVS depende da localização, microclima e cultura escolhida.

O impacto de dez parques solares no microclima e na diversidade da vegetação rural na Itália é analisado no artigo de Vervloesem et al. (2022). Os pesquisadores mensuraram variáveis como umidade, temperatura da superfície e radiação ativa fotossintética, além de levantamentos da vegetação sob os painéis, entre as fileiras dos painéis e nas imediações do parque. Os resultados demonstram que o parque solar afeta o microclima, reduzindo a radiação e a temperatura da superfície devido ao sombreamento e fluxo de ar. No entanto, a avaliação demonstra que esse impacto ambiental é baixo, indicando que a conversão de terras agrícolas convencionais em parques solares é benéfica.

A pecuária é o foco da pesquisa de Adeh et al. (2018) que avalia o impacto ambiental de painéis solares em pastagens não irrigadas e sujeitas a estresse hídrico nos Estados Unidos. Os resultados revelam que pastagens em zonas de limitação hídrica são candidatas ideais para a implementação de sistemas AVS, pois nas áreas totalmente cobertas pelos painéis houve diminuição na evapotranspiração, mantendo a umidade do solo mais elevada durante a estação seca e aumentando em 90% a produção de biomassa de capim no período.

A pesquisa de Asa'a et al. (2024) examina os benefícios econômicos do uso duplo da terra dos sistemas agrovoltáticos (AVS), combinando a produção de alimentos e a geração de energia. Os autores fazem uma revisão da literatura analisando 372 testes de campo de sombreamento em vários continentes, especialmente na Europa, e aplicam um indicador chamado Land Equivalent Ratio (LER) para determinar a eficácia no uso duplo da terra. Esse método compara separadamente a eficiência de terras destinadas exclusivamente às lavouras, áreas destinadas somente para geração de energia, e terras mistas, combinando lavouras e painéis fotovoltaicos. Geralmente, nas áreas combinadas, o LER foi superior a 1, demonstrando que o uso da área é mais eficiente no sistema integrado. Dentre as culturas agrícolas que apresentaram melhor rendimento com o aumento do sombreamento, encontram-se alface, uvas, frutas vermelhas, batata e pimentões.

A opinião da sociedade sobre sistemas (AVS) motivou a pesquisa de Pascaris et al. (2022). Os autores aplicaram um questionário a 176 participantes dos Estados Unidos com forte oposição à utilização de áreas agriculturáveis para geração de energia elétrica. O estudo revelou que 81,8% dos entrevistados seriam mais propensos a apoiar o projeto AVS em sua comunidade se ele integrasse a produção agrícola com a geração de eletricidade.

A realidade brasileira é tratada em dois artigos, a pesquisa de Vidotto et al. (2024) avalia o potencial de implementação dos sistemas agrovoltáticos (AVS) no Brasil, analisando marco regulatório, a diversidade regional e climática das regiões do Brasil e finalizando com uma matriz de análise SWOT sobre os principais aspectos da adoção da tecnologia agrovoltático

(AVS) no contexto nacional. Segundo os autores, financiamentos disponíveis como o Plano Safra criam um terreno fértil para a tecnologia, especialmente na região do Matopiba. No entanto, para expandir em larga escala, o Brasil precisa superar os altos custos iniciais (CAPEX).

No Paraná especificamente, Vieira et al. (2022) analisam o crescimento do número de conexões e da potência instalada nos estabelecimentos rurais no estado do Paraná no período entre 2016 a 2019 e afirmam que a energia solar fotovoltaica tanto off-grid como on-grid desponta como uma alternativa para garantir acesso à energia elétrica com custos operacionais menores que as fontes tradicionais.

3. Metodologia

3.1. A Simulação de Monte Carlo

Segundo Glasserman (2004), a Simulação de Monte Carlo é um modelo computacional baseado na Lei de Grandes Números e no Teorema Central do Limite (CLT) utilizado para resolver problemas matemáticos complexos, caracterizados por diferentes níveis de incerteza, por meio de componentes determinísticos e estocásticos. A principal vantagem do método é no gerenciamento de riscos em investimentos e derivativos, pois a simulação converge para o valor real à medida que o número de replicações aumenta, permitindo a uma modelagem precisa dos diversos cenários de investimento.

a) Estimador de Monte Carlo

A esperança matemática (α) com U distribuído entre 0 e 1 é dado por:

$$E[f(U)] = \alpha = \int_0^1 f(x) dx$$

No ponto n desta sequência a média dos resultados cria o estimador de Monte Carlo:

$$\hat{\alpha}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(U_i)$$

b) Lei dos Grandes Números

Essa Lei aplicada a Monte Carlo afirma que, se simulada várias vezes, a média convergirá para o valor verdadeiro em quase todas as sequências possíveis:

$\hat{\alpha}_n \rightarrow \alpha$ com probabilidade igual a 1 se $n \rightarrow \infty$

$$P \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \hat{\alpha}_n = \alpha \right) = 1$$

c) Teorema Central do Limite (TCL)

Afirma que para um n grande o estimador de monte Carlo $\hat{\alpha}_n$ se comporta como uma variável normal com média $\sigma/\sqrt{n}$ e distribuição do erro da simulação em um formato conhecido e controlável, permitindo definir o resultado em um intervalo de confiança crível.

Deste modo, sendo $\hat{\alpha}_n$ o estimador de Monte Carlo formado pela média aritmética de n simulações realizadas, α a esperança matemática, σ o desvio padrão, teremos que o erro de estimação $(\hat{\alpha}_n - \alpha)$ dividido pelo erro padrão do estimador $\sigma/\sqrt{n}$ converge para uma distribuição normal padrão:

$$\frac{(\hat{\alpha}_n - \alpha)}{\sigma/\sqrt{n}} \rightarrow N(0,1) \text{ quando } n \rightarrow \infty$$

3.2. Variáveis Financeiras

a) VPL (Valor Presente Líquido)

É o lucro real do projeto em valores atuais, já descontados todos os fluxos de caixa pelo custo de capital. Um VPL positivo indica que o projeto criou riqueza acima do custo de oportunidade do investimento, segundo Lemes Júnior et al. (2002).

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} - I_0$$

Sendo FC_t o Fluxo de Caixa no tempo t , TMA a Taxa Mínima de Atratividade e I_0 o investimento inicial do projeto.

b) TIR (Taxa Interna de Retorno)

É o valor que indica a taxa de retorno intrínseca do projeto, independentemente de qualquer taxa externa. O projeto é viável se TIR superar a TMA.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0$$

Sendo FC_t o Fluxo de Caixa no tempo t , TIR a Taxa Interna de Retorno e I_0 o investimento inicial do projeto.

c) Payback Descontado

É o valor que expressa o tempo para recuperar o investimento inicial descontado pelo TMA. É mais realista que o payback simples.

$$PB_{desc} = \min \left\{ n: \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \geq I_0 \right\}$$

d) ROI (Retorno sobre o Investimento)

É o valor que representa o percentual do retorno líquido gerado em relação ao capital investido, indicando a eficiência do negócio em gerar lucro por real investido.

$$ROI = \frac{VPL}{I_0} \times 100$$

Essa formulação, adotada por Lemes Júnior et al. (2002), incorpora o valor do dinheiro no tempo ao descontar os fluxos de caixa pela TMA, diferenciando-se do ROI contábil calculado sobre lucro nominal.

3.3. Base de Dados da Simulação de Monte Carlo

Os parâmetros da simulação organizam-se em três categorias. Os valores determinísticos, obtidos por meio de consultas junto às empresas do setor e definem a estrutura física do sistema. As variáveis estocásticas introduzem a incerteza mediante coeficientes de perturbação probabilística, enquanto as variáveis endógenas são calculadas internamente a partir das duas categorias anteriores.

a) Variáveis Determinísticas

A Tabela 1, obtida junto às empresas fornecedoras de painéis solares, demonstra que para atingir a renda desejada o sistema deve ser composto por 50 painéis para produzir 27,5 kW. O custo desses painéis mais ferragem extra e logística rural totalizam um investimento na instalação de aproximadamente R\$ 80.000,00. A capacidade do sistema é calculada a partir do número de painéis e da capacidade de cada um dos painéis em gerar eletricidade.

Tabela 1 – Conjunto das variáveis fixas da simulação de Monte Carlo

Variáveis Determinísticas	Valor Base	Definição
n_painéis [un]	50	Número de painéis instalados
potencia_painel [W]	550	Potência nominal de cada módulo
capacidade [kWp]	27,5	Potência instalada do sistema fotovoltaico
custo_por_modulo [R\$]	1.500,00	Valor unitário por painel
investimento_base [R\$]	80.000,00	Custo da instalação do sistema (CAPEX)
rem_coop [R\$/kWh]	0,42	Remuneração pela compra do excedente
rem_cons [R\$/kWh]	0,84	Remuneração devido ao consumo próprio
vida_util [meses]	300	Horizonte temporal do projeto (25 anos)
n_sim [um]	10.000	Número de simulações de Monte Carlo

Fonte: elaboração própria.

b) Variáveis Estocásticas

Segue Tabela 2 com os valores estocásticos utilizados na pesquisa:

Tabela 2 – Conjunto das variáveis estocásticas (independentes) da simulação de Monte Carlo

Variáveis Estocásticas	Valor Base	Taxa Var. Estocástica	Definição
custo_avs [R\$]	80.000,00	+/- 10%	Custos de instalação do CAPEX
manutencao_avs [R\$]	150,00	+/- 15%	Custo de manutenção mensal
depreciacao_avs [%]	0,8	+/- 0,2 p.p	Depreciação anual dos painéis
geracao_avs [kWh/mês]	2.960	+/- 10%	Geração mensal dos painéis
fra_cons_avs [%]	33	+/- 10%	Fração da geração em consumo próprio
tma_avs [% a.a]	6	+/- 1 p.p	Taxa de atratividade anual

Fonte: elaboração própria.

O primeiro caso é a componente “custo_avs” que é o custo do sistema formado pela variável determinística “investimento_base” e um coeficiente de perturbação estocástica de 10%, influenciado pela variação cambial, visto que os painéis solares são importados da China.

A componente “manutencao_avs” corresponde aos custos de manutenção. Em sistemas de painéis fotovoltaicos, representam 1% do investimento, o que totalizaria anualmente R\$ 800,00, mas no projeto foi utilizado um valor base anual de R\$ 1.800,00 (2,25%), um valor mais conservador considerando uma instalação rural mais sujeita à terra e ventos. A variável depreciação do equipamento é padronizada, em 0,8% ao ano, com aproximadamente 0,2 pontos percentuais de coeficiente de perturbação estocástica.

A componente “geracao_avs” parte do valor base de 2.960 kWh de energia produzida. A dispersão considerada foi de 10%, considerada no Atlas de Energia Solar do Paraná para variações no IPI (Irradiância no Plano Inclinado) conforme Figura 1.

A componente “fra_cons_avs” reflete a parcela da energia produzida que compensa o consumo da propriedade rural, o excedente é comercializado com uma cooperativa que revende no mercado. O valor base é definido como 33% para consumo e 66% para revenda. Isto é importante, pois a remuneração de cada um deles, consumo ou cooperativa, é diferente.

A última componente estocástica considerada foi “tma_avs” definida como a taxa de atratividade mínima do projeto e definido o valor de 6% com uma dispersão de 1p.p, ou seja, entre 5% e 7%. Este valor de referência foi definido por apresentar valor um pouco superior a um investimento de renda fixa.

c) Variáveis Endógenas

A Tabela 3 é formada por variáveis endógenas que são calculadas dentro do sistema.

Tabela 3 – Conjunto das variáveis calculadas pela simulação de Monte Carlo

Variáveis Endógenas	Definição
fra_coop_avs [%]	Fração energia comercializada (+/- 10%)
tarifa_liq [R\$/kWh]	Tarifa considerando o Fio B
preco_med_avs [R\$]	Preço médio considerando todos as taxas
renda_avs [R\$]	Renda mensal para o investidor
ret_fiob [un]	Retenção de Fio B. Vetor de valores: 0,18 / 0,225 / 0,27 / 0,30

Fonte: elaboração própria.

A tarifa de eletricidade inclui a componente Fio B, correspondente a 30% da fatura, remunera a manutenção da rede de distribuição local composta por postes, transformadores e cabos. Segundo a regra de transição vigente da ANEEL, reduzirá anualmente a parte da distribuição que pode ser remunerada ao produto individual. Em 2026, 60% do valor é descontado e 40% remunerado, em 2027 será 75%/25%, em 2028 90%/10% respectivamente. Assim, foi criado um vetor que abate 60% dos 30% da distribuição ($0,6 \times 0,3 = 0,18$ em 2026), 75% de 30% ($0,75 \times 0,3 = 0,225$) e 90% de 30% ($0,9 \times 0,3 = 0,27$) em 2029 e 100% a partir de 2030 ($1 \times 0,3 = 0,3$), assim a variável “ret_fiob” assume os valores 0,18 (2026), 0,225 (2027), 0,27 (2029) e 0,30 (a partir de 2030), quando a parte da distribuição será paga totalmente pelo produtor rural. Deste modo, o cálculo fica da seguinte forma:

A variável “fra_coop_avs” é a parcela da geração repassada para a cooperativa:

$$fra_coop_avs = 1 - fra_cons_avs$$

A variável “tarifa_liq” considera o vetor de dados de Fio B até 2030:

$$tarifa_liq = rem_cons \times (1 - ret_fiob)$$

A variável “preco_med_avs” é calculada a partir do ganho compensado pelo consumo e da parte excedente revendida para a cooperativa pelo valor pago de cada um deles:

$$preco_med_avs = (fra_cons_avs \times tarifa_liq) + (fra_coop_avs \times rem_coop)$$

A última variável endógena é a renda média do sistema destinada ao produtor rural que instalou o sistema e que considera também o custo mensal de manutenção do sistema.

$$renda_avs = (geracao_avs \times preco_med_avs) - manutencao_avs$$

4. Análise de Resultados

Antes de analisar os resultados da Simulação de Monte Carlo é importante avaliar brevemente a situação do estado do Paraná, pois todo o projeto será infrutífero se a simulação de Monte Carlo demonstrar a viabilidade econômica do projeto, mas o estado não tiver um perfil de radiação solar que permita gerar uma renda para o agricultor com o menor investimento possível e se o estado não tiver um número significativo de propriedades que se enquadrem como propriedade familiar.

4.1. Análise de Incidência Solar no Estado do Paraná

a) Resultado IPI

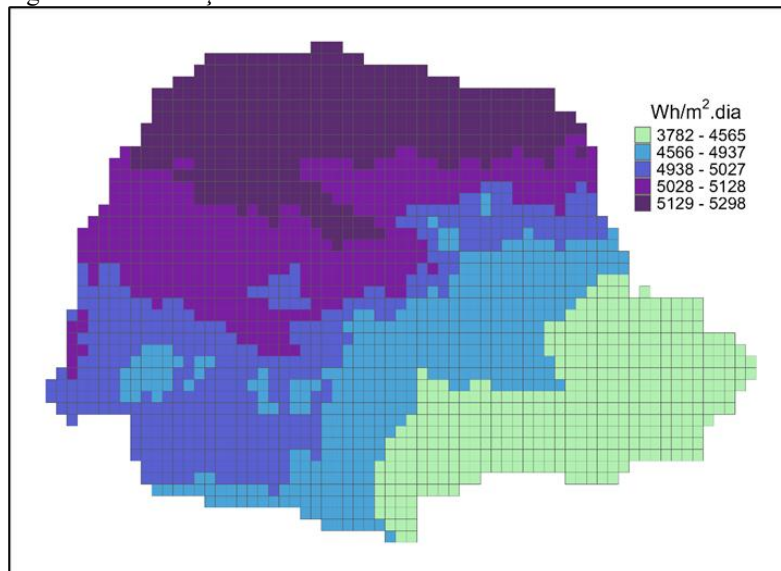
A geração de eletricidade de um sistema agrovoltáico depende diretamente do IPI (Irradiância no Plano Inclinado), medido em Wh/m².dia, quanto maior for o IPI médio da região, maior a produção mensal em kWh.

Nas próximas seções, é demonstrado que o sistema agrovoltáico foi projetado para fornecer 2.960 kWh. Esse nível de geração pode ser conseguido com segurança na Região 2 (4566 Wh/m².dia – 4937 Wh/ m².dia) e Região 3 (4938 Wh/ m².dia – 5027 Wh/ m².dia), sendo

otimizado para uso nas regiões 4 (5028 Wh/ m².dia – 5128 Wh/ m².dia) e Região 5 (5129 Wh/ m².dia – 5298 Wh/ m².dia).

A Figura 1 demonstra a distribuição de IPI no estado do Paraná.

Figura 1: Distribuição de IPI médio no Paraná



Fonte: elaborado pelos autores com dados do LABREN (2025)

No caso de investidores desejarem implantar o sistema AVS na Região 1 (3782 Wh/ m².dia – 4565 Wh/ m².dia), composta pelo litoral, Serra do Mar e Região Metropolitana de Curitiba, existe um risco real, especialmente no litoral, do sistema não conseguir atingir um valor mínimo de R\$ 1.000,00 durante o inverno ou em meses com maior volume de chuvas.

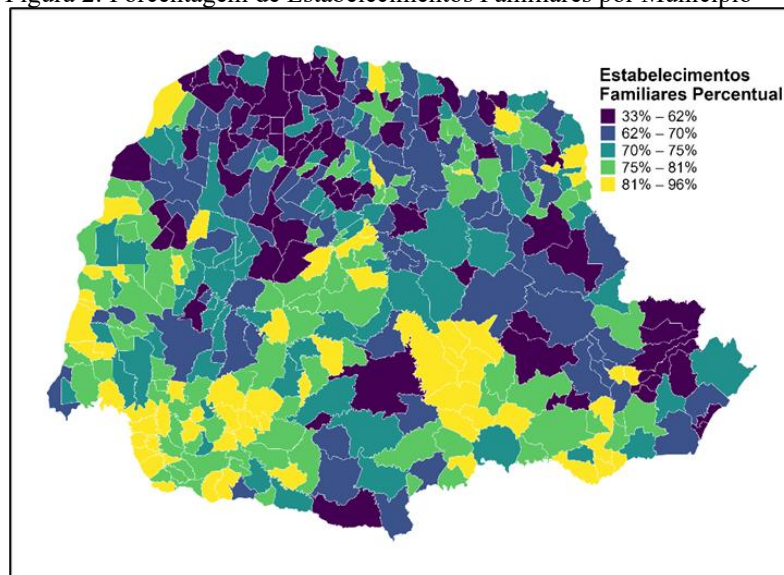
4.2. Distribuição da Agricultura Familiar no Paraná

O estado do Paraná possui aproximadamente 228.891 estabelecimentos familiares, segundo dados do “Censo Agro 2017” do IBGE (2025). Segundo o censo, estabelecimento agropecuário é toda unidade de produção ou exploração dedicada a atividades agropecuárias.

Em seguida, é apresentado um segundo gráfico que avalia o número de propriedades familiares por município do estado. Esses dois gráficos devem ser analisados em conjunto com o gráfico de IPI para verificar se as regiões com maior índice de IPI coincidem com as regiões de maior volume de propriedades familiares.

A distribuição percentual das propriedades familiares é apresentada com detalhes na Figura 2, enquanto a Figura 3 se concentra no número total de estabelecimentos familiares em cada um dos 399 municípios paranaenses.

Figura 2: Porcentagem de Estabelecimentos Familiares por Município



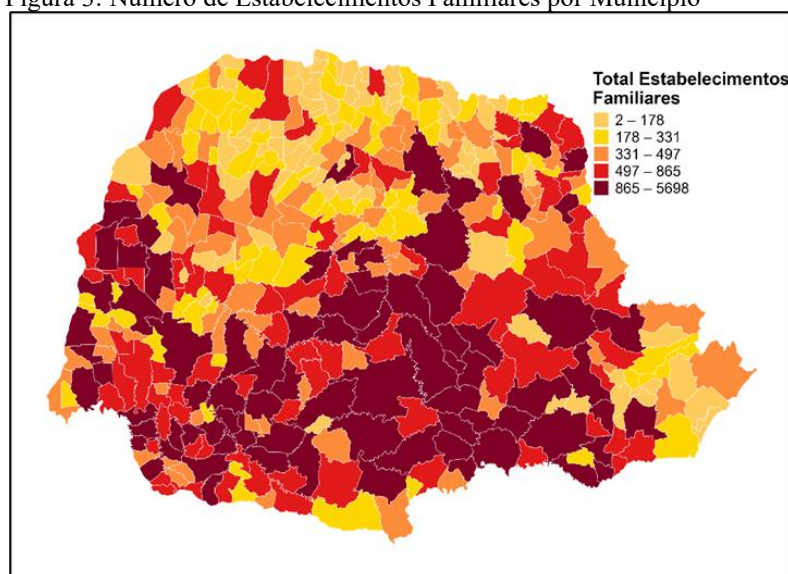
Fonte: elaborado com dados do Censo Agro 2017, IBGE (2025)

Após análise, verifica-se que a região percentual com maior número de propriedades familiares está localizada no sul e leste do estado, áreas que não convergem com as regiões de maior IPI encontradas nas regiões norte, centro e oeste do estado.

No entanto, devido ao perfil histórico de colonização do estado do Paraná, um número significativo de propriedades familiares é distribuído em todo o estado, viabilizando assim o projeto. No sul, os municípios têm uma grande área geográfica, permitindo, em alguns casos, mais de 1000 estabelecimentos familiares, enquanto no norte do estado os municípios são menores, compreendendo assim um número inferior de estabelecimentos familiares.

O número de propriedades familiares no Paraná pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Número de Estabelecimentos Familiares por Município



Fonte: elaborado com dados do Censo Agro 2017, IBGE (2025)

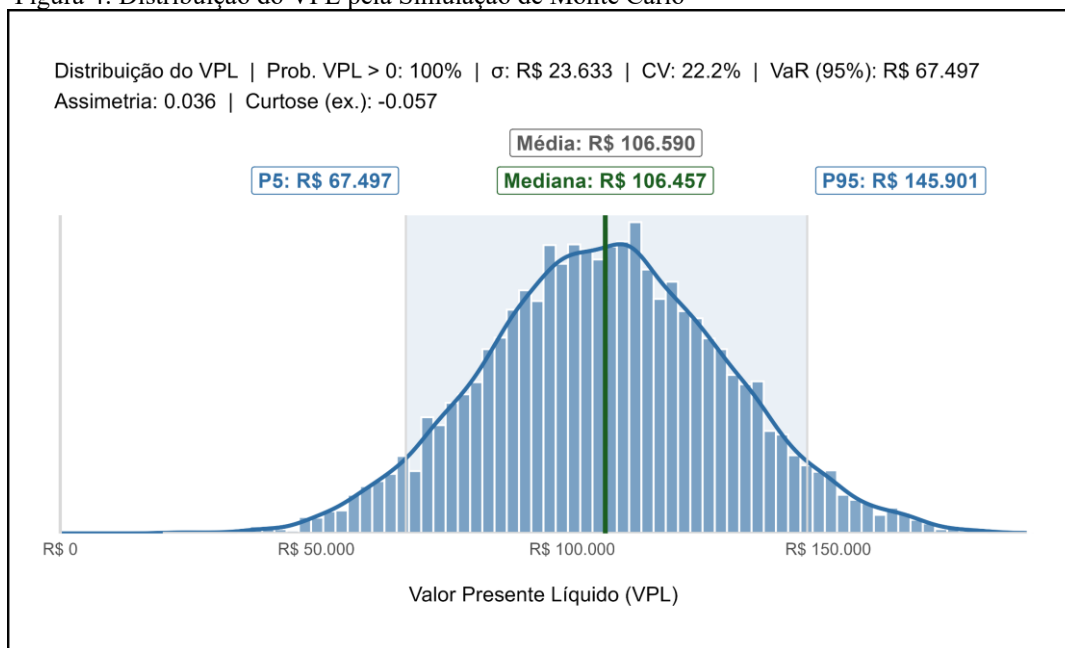
4.3. Análise da Simulação de Monte Carlo

a) VPL

A distribuição do VPL é analisada a partir de três medidas: média, mediana e intervalo de percentis de 90%. A média aritmética é constituída pela soma aritmética de todos os VPLs calculados divididos pelo número de simulações (10.000), enquanto a mediana divide a distribuição ao meio, com 50% dos valores simulados abaixo e 50% acima dela. Quando a diferença entre média e mediana é expressiva, a distribuição apresenta assimetria, pois os valores extremos nas caudas deslocam a média em sua direção sem afetar a mediana. O intervalo de percentis de 90% — delimitado por P5 e por P95 — indica a área do gráfico que concentrou 90% dos valores calculados após 10.000 simulações.

A distribuição do VPL pode ser analisada na Figura 4:

Figura 4: Distribuição do VPL pela Simulação de Monte Carlo



Fonte: elaborado pelos autores

A simulação de Monte Carlo demonstrou que os valores de P5, P95 e mediana se estabilizaram após 4.000 simulações e apresentaram valores para a mediana de R\$ 106.457,00 e média de R\$ 106.590,00 — diferença de somente R\$ 133,00, equivalente a 0,07% do valor central, confirmando uma distribuição praticamente simétrica. O intervalo de percentis de 90% ficou entre P5 = R\$ 67.497,00 e P95 = R\$ 145.901,00, indicando que 90% das 10.000 iterações geraram VPL dentro dessa faixa.

A curva formada pela simulação dos valores de VPL apresentou uma distribuição praticamente simétrica com índice de assimetria de 0,036, um valor considerado baixo e com

curtose em excesso de $-0,057$, isso indica uma distribuição com pico ligeiramente mais achatado e caudas menos pesadas que a normal.

O desvio padrão da simulação foi de R\$ 23.633,00 e quantifica a dispersão dos valores simulados em torno da média, enquanto o *Value at Risk* a 95% (VaR 95%) foi de R\$ 67.497,00, indicando que em 95% das simulações o VPL é superior ou igual a este valor e em somente 5% dos casos é menor. O VaR(95%) coincide com P5 do intervalo de percentis, pois ambos representam o 5º percentil da distribuição simulada. Já o CV de 22,2% revela o valor relativo do desvio padrão em relação à média, indicando uma concentração moderada de valores compatíveis com projetos de infraestrutura de longo prazo.

b) TIR

A TIR apresentou intervalo de percentis de 90% entre 14,5% (P5) e 26,8% (P95). Essa amplitude de 12,3 pontos percentuais reflete o nível de incerteza capturada pela simulação. O limite inferior do intervalo (P5 = 14,5%) supera a TMA, e pode-se verificar também que em praticamente 100% dos casos a TIR foi superior a 10%, valor também superior à TMA de 6%. Em apenas 5% das iterações a TIR ficou abaixo de 14,5% e em 5% superou 26,8%.

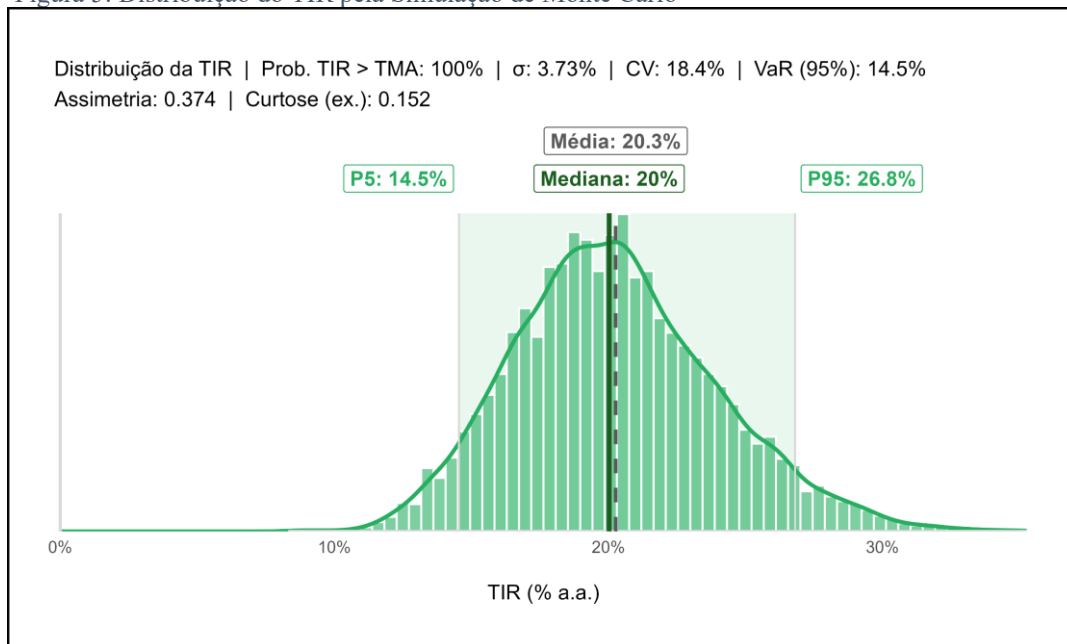
A proximidade entre média (20,3%) e mediana (20%), diferença de 0,3 ponto percentual, confirma distribuição com baixa assimetria e sem viés direcional relevante. A distribuição da TIR é ligeiramente assimétrica à direita, com dispersão moderada e ausência de caudas pesadas.

O desvio padrão de 3,73% quantifica a dispersão dos valores simulados em torno da média, caracterizando nível moderado de incerteza. O coeficiente de variação indica que a dispersão relativa representa 18,4% do valor central esperado, nível compatível com projetos de infraestrutura de longo prazo. Já o VaR(95%) de 14,5% indica que, em 95% das simulações, a TIR foi superior a esse valor, enquanto somente nos 5% restantes a TIR produzida foi inferior a esse limiar.

A assimetria de $+0,374$ indica distribuição levemente enviesada à direita, com mediana posicionada à esquerda da média e cauda mais alongada em direção a valores superiores. A curtose em excesso de 0,152 indica distribuição próxima ao padrão normal sem ocorrência de eventos extremos.

A distribuição da TIR do projeto é apresentada na Figura 5, demonstrando seus valores de mediana, média e assimetria, entre outras variáveis:

Figura 5: Distribuição do TIR pela Simulação de Monte Carlo



Fonte: elaborado pelos autores

c) Payback Descontado

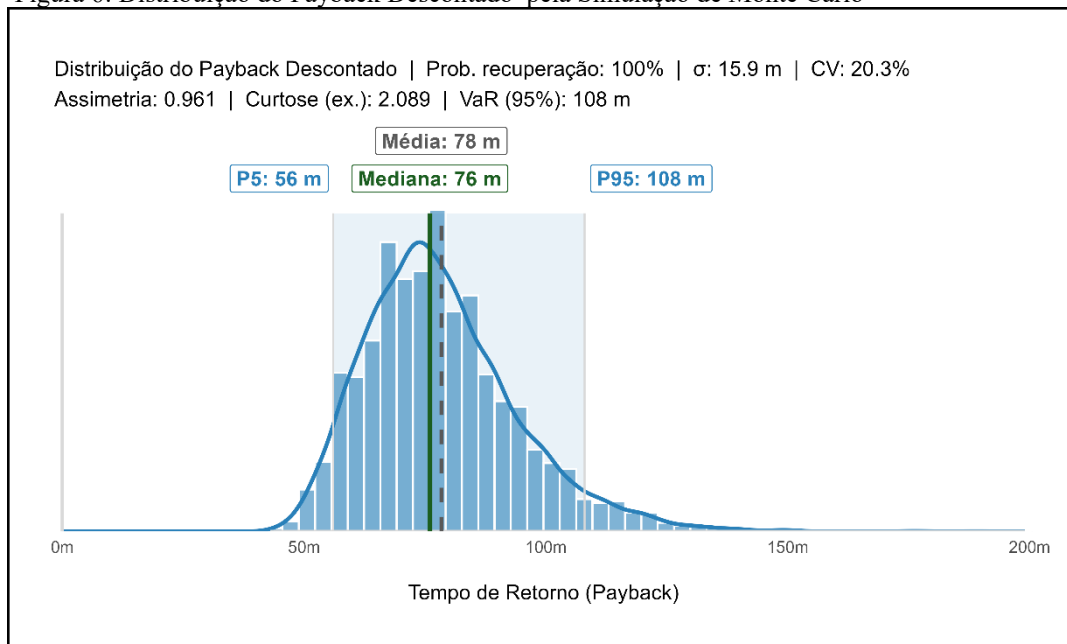
O terceiro gráfico acima corresponde ao Payback Descontado, que é muito útil, pois mede o risco de liquidez do projeto, indicando o tempo necessário para que os fluxos de caixa projetados recuperem o capital investido. No caso foi considerado o Payback Descontado, que utiliza o próprio TMA como taxa de desconto.

A diferença entre média e mediana é de apenas 2 meses, com a média tendo 78 meses e a mediana com 76 meses. O Intervalo de percentis de 90% indica que em 90% dos casos o payback ocorrerá entre 56 meses (aproximadamente 4,7 anos) e 108 meses (aproximadamente 9 anos). A dispersão medida pelo desvio padrão é de 15,9 meses. O Coeficiente de Variação (CV) foi de 20,3%, valor moderado e aceitável em projetos de longo prazo e o *Value at Risk* a 95% (VaR 95%) indica que, em 95% das simulações, o retorno ocorreu em menos de 108 meses (9 anos), no caso do Payback o modo de analisar o VaR é diferente do VPL e TIR. Como a vida útil do sistema é de 25 anos, os valores encontrados na simulação de Monte Carlo confirmam a viabilidade financeira do projeto agrovoltáico no Paraná.

A assimetria positiva de +0,961 reflete uma distribuição moderadamente assimétrica à direita, valor superior aos encontrados nas simulações de VPL e TIR. A distribuição apresenta uma moda (pico) mais à esquerda da média.

As simulações de Payback Descontado contendo mediana, média, desvio padrão e VaR são apresentadas na Figura 6.

Figura 6: Distribuição do Payback Descontado pela Simulação de Monte Carlo



Fonte: elaborado pelos autores

d) ROI

O ROI (*Return on Investment*) mede o retorno líquido do projeto em proporção ao investimento inicial, indicando, assim, a eficiência do negócio em gerar lucro por real investido. Com ROI mediano de 132,9% nas simulações, o sistema agrovoltaico gera Valor Presente Líquido equivalente a mais de 130% do capital investido, ou seja, R\$ 1,33 de retorno líquido descontado para cada R\$ 1,00 aplicado, além da recuperação do capital inicial.

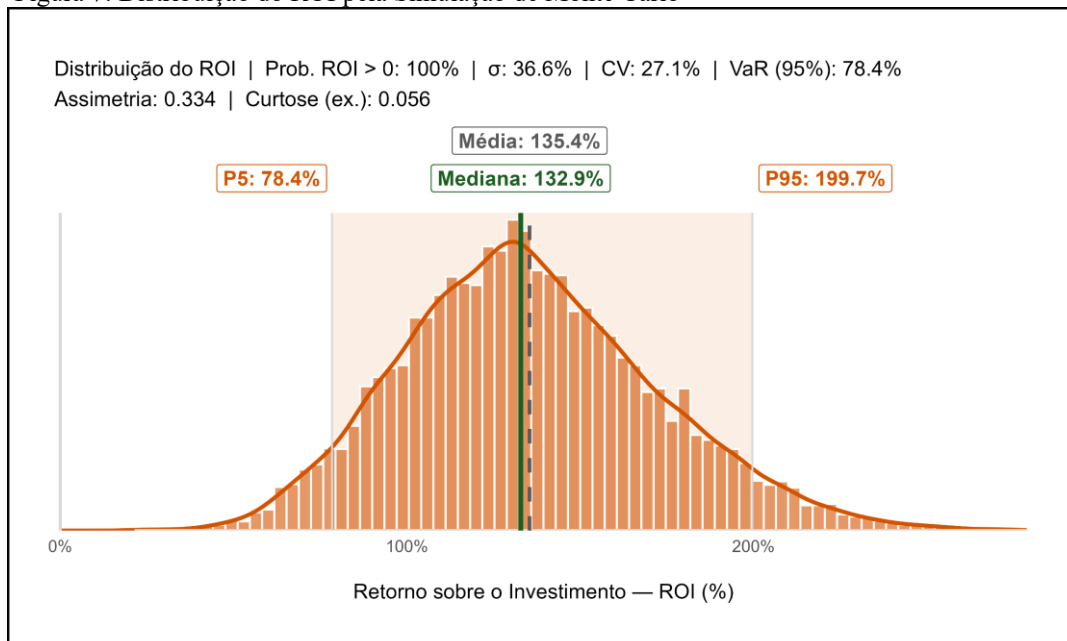
O desvio padrão de 36,6 pontos percentuais reflete dispersão moderada em torno da média, resultando em curva de largura média no gráfico de distribuição. O Coeficiente de Variação que mede a dispersão em termos relativos foi de 27,1% valor ainda moderado, mas próximo ao tradicional limiar de 30% que indicaria alta variabilidade e um resultado muito sensível às incertezas do negócio. O *Value at Risk* a 95% (VaR 95%) de 78,4% indica que em 95% das simulações o ROI superou esse valor.

A assimetria de +0,334 indica distribuição levemente assimétrica à direita, com moda posicionada à esquerda da média e cauda direita mais pronunciada, comportamento refletido na diferença de 2,5 pontos percentuais entre média (135,4%) e mediana (132,9%). A curtose em excesso de +0,056 caracteriza distribuição praticamente normal, sem concentração irregular nas caudas e sem diferença perceptível no pico em relação à curva gaussiana padrão.

A diferença de 2,5 pontos percentuais entre média (135,4%) e mediana (132,9%) é pequena e reflete a pressão da assimetria positiva sobre o valor médio, indicando uma curva levemente assimétrica.

A Figura 7 representa distribuição do ROI (Retorno sobre Investimento).

Figura 7: Distribuição do ROI pela Simulação de Monte Carlo



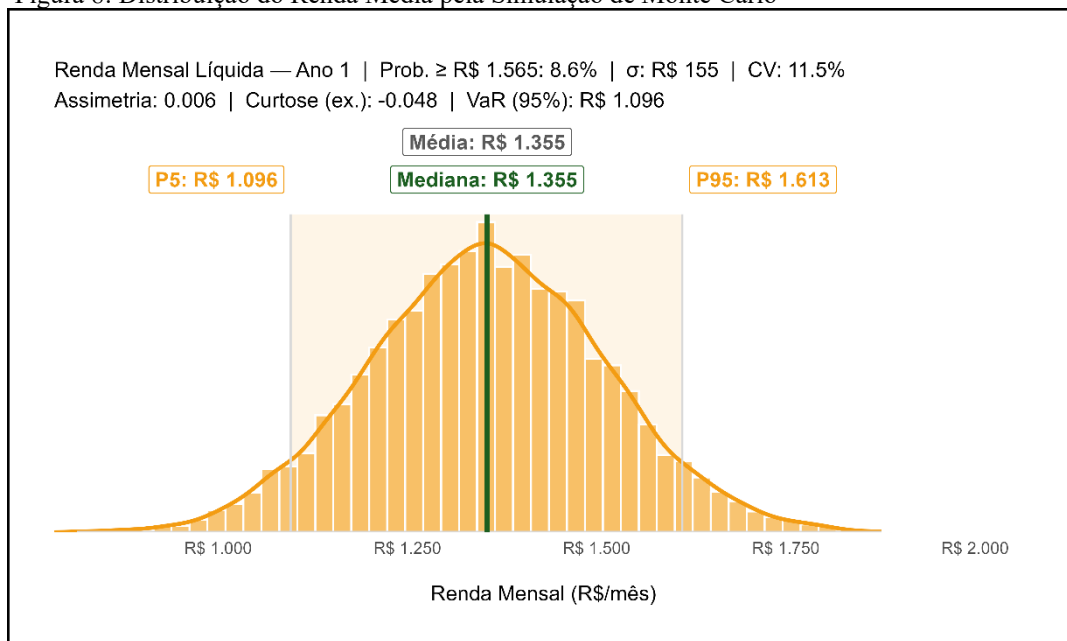
Fonte: elaborado pelos autores

e) Renda Mensal Média

A Renda Mensal Líquida é o indicador mais diretamente ligado à realidade cotidiana do agricultor familiar e representa a receita mensal disponível ao investidor após as deduções com custos de manutenção.

A Figura 8 representa a renda mensal do agricultor após 10.000 simulações.

Figura 8: Distribuição do Renda Média pela Simulação de Monte Carlo



Fonte: elaborado pelos autores

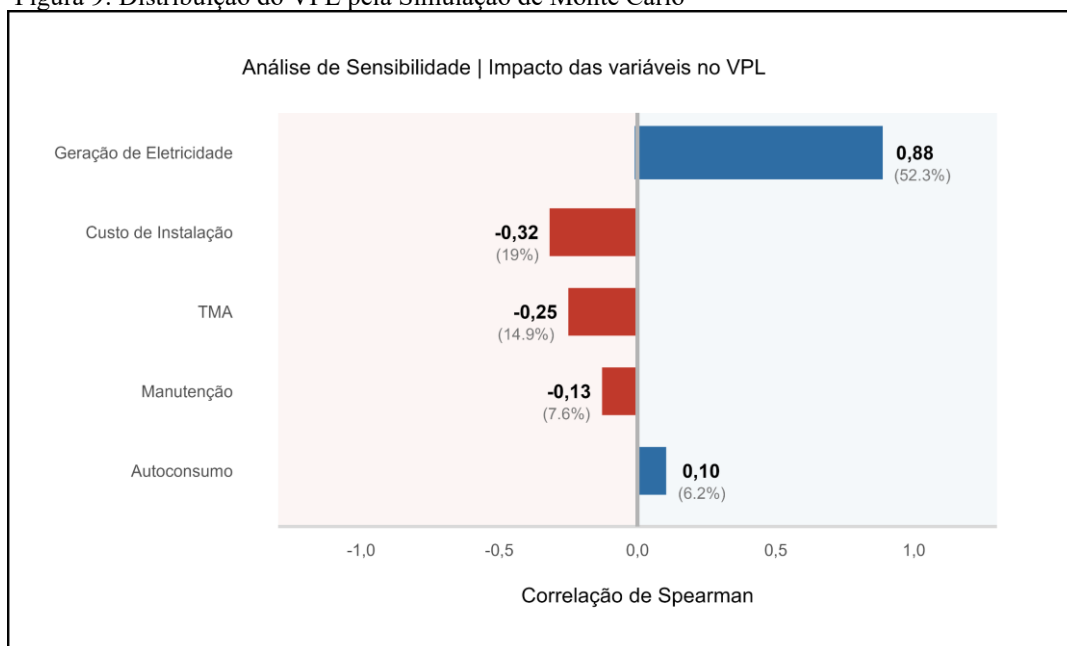
A mediana e a média apresentaram o mesmo valor de R\$ 1.355,00 e o gráfico também indica haver 5% de chances de a renda recebida superar R\$ 1.613,00. O intervalo de percentis de 90% ficou entre P5 = R\$ 1.096,00 e P95 = R\$ 1.613,00, indicando que 90% das simulações produziram renda dentro dessa faixa. O VaR(95%) coincide com P5, pois ambos representam o 5º percentil da distribuição, confirmando que em apenas 5% das iterações a renda ficou abaixo de R\$ 1.096,00 indicando que apenas 5% das iterações produziram renda abaixo desse limiar.

Os valores de renda têm pouca dispersão, com desvio padrão de apenas R\$155,00 e a assimetria da Renda Mensal Líquida de +0,006 é mínima, o que caracteriza uma curva de distribuição praticamente simétrica com curtose em excesso de apenas -0,048.

f) Análise de Sensibilidade

A Figura 9 representa a Análise de Sensibilidade das variáveis de Monte Carlo.

Figura 9: Distribuição do VPL pela Simulação de Monte Carlo



Fonte: elaborado pelos autores

A análise de sensibilidade utiliza a correlação de Spearman para identificar as variáveis que exercem maior influência no resultado final.

A Geração de Eletricidade apresentou o maior coeficiente positivo de 0,88, próximo ao valor máximo de 1, correspondendo a 52,3% de toda a variação do VPL. O custo de instalação foi a variável com maior impacto negativo, respondendo por aproximadamente 19% da variação do VPL, enquanto a TMA influenciou aproximadamente 14,9% do resultado quando sujeita à variação.

5. Considerações finais

Os sistemas agrovoltáticos (AVS) demonstraram viabilidade econômica no Paraná, com renda mensal mediana de R\$ 1.355,00 e probabilidade de 95% de recuperação do investimento em até 9 anos, resultados consistentes diante das incertezas modeladas pela simulação. Diferente de modelos puramente energéticos, a proposta agrovoltática não visa a substituição da produção de alimentos por grandes usinas fotovoltaicas, mas sim a otimização do uso do solo, permitindo a coexistência da atividade agrícola com a geração de energia limpa e renovável, garantindo uma fonte de renda extra para as famílias no campo.

A integração de análise geoespacial solarimétrica com a modelagem financeira estocástica, por meio do Método de Monte Carlo aplicada ao contexto da agricultura familiar paranaense, é a principal contribuição científica do estudo, superando as análises puramente determinísticas da literatura anterior sobre sistemas AVS no Brasil. A análise geoespacial, baseada no Atlas de Energia Solar do Paraná, validou as regiões norte, oeste e central do estado como regiões propícias para implantação do sistema, em razão de possuírem índices de irradiação (IPI) acima de 4.500 Wh/m².dia, favoráveis para geração de eletricidade. A capilaridade das propriedades familiares em todo o território paranaense reforça a escalabilidade do projeto.

Para avaliar a viabilidade econômica sob condições de incerteza, utilizou-se a Simulação de Monte Carlo, permitindo a análise estocástica de variáveis como VPL, TIR, Payback Descontado e ROI. Os resultados apontaram VPL mediano de R\$ 106.457,00 e TIR de 20%, ambos com CV abaixo de 25%, indicando dispersão compatível com projetos de infraestrutura de longo prazo.

O modelo incorporou as alterações regulatórias recentes como a Lei 14.300/22 e Fio B, mas não considerou o fenômeno de *curtailment* que é o corte de geração para grandes usinas fotovoltaicas imposto pela ONS quando há excesso de oferta de energia e que, caso essas interrupções sejam estendidas à geração distribuída, podem elevar a incerteza das métricas e resultados da simulação de Monte Carlo. Na mensuração do impacto dos painéis sobre a produção agropecuária, recorreu-se somente a estudos europeus devido à escassez de análises empíricas aplicadas à realidade nacional.

A metodologia pode ser replicada em outras regiões brasileiras, especialmente no semiárido, que por apresentar IPI médio superior ao do sul do Brasil, permite instalar sistemas AVS mais eficientes e mais baratos, o que resulta em renda mensal igual ou superior à encontrada no Paraná.

Referências

- ADEH, E.H; SELKER, J. S.; HIGGINS, C. W. **Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency**. PLoS ONE, v. 13, n. 11, art. e0203256, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- ASA'A, S. et al. **A multidisciplinary view on agrivoltaics**: future of energy and agriculture. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 200, art. 114515, 2024.
- GLASSERMAN, P. **Monte Carlo Methods in Financial Engineering**. New York: Springer, 2004.
- IBGE. **Mapas interativos do Censo Agropecuário 2017**: indicadores municipais. Disponível em: <https://mapasinterativos.ibge.gov.br/agrocompara/>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- IPCC. **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Lee, H.; Romero, J. (eds.). Geneva: IPCC, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 06 de abr. de 2026.
- KRISHNAMURTHY, Anuj; SERPELL, Oscar. **Harvesting the Sun**: on-farm opportunities and challenges for solar development. Philadelphia: Kleinman Center for Energy Policy, University of Pennsylvania, jul. 2021
- LABREN. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_PR_2017.html. Acesso: 05 de abr. de 2026.
- LEMES JÚNIOR, Antônio Barbosa; RIGO, Cláudio Miessa; CHEROBIM, Ana Paula Mussi Szabo. **Administração Financeira**: princípios, fundamentos e práticas brasileiras. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 2002.
- PASCARIS, A. S. et al. **Do agrivoltaics improve public support for solar?** Green Technology, Resilience, and Sustainability, v. 2, art. 8, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44173-022-00007-x>
- PORTAL SOLAR. **Painéis Solares**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>. Acesso em: 5 de abr. de 2026.
- VERVLOESEM, J.; MARCHEGGIANI, E.; CHOUDHURY, M. A. M.; MUYS, B. **Effects of photovoltaic solar farms on microclimate and vegetation diversity**. Sustainability, v. 14, n. 12, p. 7493, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127493>
- VIDOTTO, Laís Cassanta; SCHNEIDER, Kathlen; MORATO, Ramom Weinz; NASCIMENTO, Lucas Rafael do; RÜTHER, Ricardo. **An evaluation of the potential of agrivoltaic systems in Brazil**. Applied Energy. Elsevier, v. 360, art. 122782, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122782>.
- VIEIRA, Matheus Felipe Ziermann; MICHELLON, Ednaldo. **Evolução da eletrificação fotovoltaica rural no estado do Paraná de 2016 a 2019**. Revista Grifos, v. 31, n. 57, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.22295/grifos.v31i57.6710>
- WIDMER, J.; CHRIST, B.; GRENZ, J.; NORGROVE, L. **Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production**: a systematic review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 192, art. 114277, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114277>