

Otimização da Alocação de Recursos Financeiros no Plano ABC+ para Mitigação de GEE na Agropecuária Brasileira

Adalberto Araujo Aragão¹, Alessandro Dias Guedes¹, Thales Dias Braga¹,
Rodrigo Gonçalves Pinto¹, Edison Ishikawa¹

¹Departamento de Ciências da Computação
Universidade de Brasília (UnB) – Brasília – DF – Brasil

{adalberto.aragao1001,alessandrofisico,thales89dias}@gmail.com,

{rodrigo.pinto,ishikawa}@unb.br

Abstract. *Climate change is a challenge for agriculture, a sector responsible for a significant share of greenhouse gas (GHG) emissions. In Brazil, the ABC Plan (now called ABC+) seeks to promote sustainable agricultural practices. This article employs computational multi-objective optimization methods to maximize the efficiency of this policy, analyzing resource allocations based on carbon dioxide equivalent emissions (CO₂e emissions), rural population, and financed area. The results highlight optimized strategies that balance environmental and social goals, aligning the plan with the Paris Agreement and the carbon market. The study also identifies methodological challenges and reinforces Brazil's role in combating climate change.*

Resumo. *As mudanças climáticas são um desafio para a agricultura, setor responsável por grande parte das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa). No Brasil, o Plano ABC (agora chamado de ABC+) procura promover práticas agrícolas sustentáveis. Este artigo utiliza métodos computacionais de otimização multiobjetivo para maximizar a eficiência dessa política, analisando alocações de recursos com base em emissões de CO₂ equivalente (emissões de CO₂e), população rural e área financiada. Os resultados destacam estratégias otimizadas que equilibram objetivos ambientais e sociais, alinhando o plano ao Acordo de Paris e ao mercado de carbono. O estudo também identifica desafios metodológicos e reforça o papel do Brasil no combate às mudanças climáticas.*

1. Introdução

As mudanças climáticas, impulsionadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), representam um dos maiores desafios contemporâneos. Essas emissões, resultantes principalmente da queima de combustíveis fósseis e da alteração no uso do solo, provocam impactos significativos sobre o clima global, a biodiversidade, a agricultura, a saúde pública e a economia [Souza and Corazza 2017]. No cenário internacional, o Protocolo de Kyoto (1997) e, posteriormente, o Acordo de Paris consolidaram o compromisso dos países na redução das emissões, promovendo mecanismos de mercado e tecnologias sustentáveis [Souza and Corazza 2017]. No Brasil, a agropecuária, apesar de sua relevância econômica, é um dos principais setores emissores, o que reforça a importância de programas como o Plano ABC e sua versão atualizada, o Plano ABC+, voltados à disseminação de práticas agrícolas de baixa emissão [Soares and Cunha 2019, MAPA 2023].

Em alinhamento com as metas assumidas na COP 29 — que preveem a redução das emissões líquidas entre 59% e 67% até 2035 (base 2005) e a neutralidade climática até 2050 [Gov 2024] —, torna-se essencial otimizar a alocação de recursos financeiros para potencializar os impactos positivos dessas políticas. Este artigo analisa estratégias de distribuição no âmbito do Plano ABC+, considerando restrições orçamentárias, fatores regionais e a efetividade das práticas financiadas. Defendemos que a eficiência na aplicação dos recursos é determinante para ampliar a adoção de tecnologias sustentáveis, especialmente no setor agropecuário, e que essas ações devem estar integradas a iniciativas estruturais voltadas à mitigação, à redução direta de emissões e à promoção de benefícios ambientais, econômicos e sociais [Soares and Cunha 2019, MAPA 2023].

2. Trabalhos Relacionados

Diversos estudos discutem os desafios globais relacionados às mudanças climáticas, como a evolução dos compromissos internacionais de mitigação. Souza e Corazza [2017] analisam os efeitos da transição do Protocolo de Kyoto para o Acordo de Paris, destacando o aumento das emissões em países não signatários e a ampliação da participação global por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), mais flexíveis e inclusivas em comparação às metas rígidas do acordo anterior [Souza and Corazza 2017]. No contexto brasileiro, a busca pela eficiência ambiental continua sendo crítica, especialmente nos setores agropecuário e energético. Soares e Cunha [2019] ressaltam a importância de políticas públicas voltadas à adoção de tecnologias sustentáveis, como as promovidas pelo Plano ABC+, que, apesar de seus avanços, ainda enfrenta entraves financeiros e regionais para implementação em larga escala [Soares and Cunha 2019, MAPA 2023]. Além disso, a recente Lei nº 15.042 de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), reforça a importância da otimização de recursos para a agricultura de baixo carbono, alinhando assim o Plano ABC+ às metas climáticas globais [Brasil 2024].

No campo da otimização, destaca-se a consolidação das **metaheurísticas multiobjetivo** como ferramentas eficazes para problemas complexos de alocação. O algoritmo NSGA-III tem sido amplamente adotado em contextos como roteamento, escalonamento, mochila e alocação de recursos, demonstrando robustez na resolução de problemas com múltiplos objetivos conflitantes e restrições severas [Verma et al. 2021]. Essas características se alinham à estrutura do problema abordado neste estudo. Gilli e Winker [2008] reforçam a aplicabilidade de algoritmos evolutivos em contextos econômicos nos quais métodos tradicionais apresentam limitações, apontando a modelagem de políticas públicas como um campo promissor para tais abordagens [M. Gilli 2008]. Assim, este trabalho contribui de forma inovadora para a literatura ao empregar técnicas multiobjetivo na redistribuição de recursos do Plano ABC+, combinando critérios ambientais e econômicos com base em dados reais.

3. Metodologia

Este estudo utilizou como fonte primária dados públicos disponibilizados pelo **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**, em conjunto com o **Banco Central do Brasil (Financiamento Rural - BCB)**, o **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Censo Agropecuário 2022 - IBGE)** e o **Sistema de Estimativas de**

Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). As informações, organizadas por Unidade da Federação, foram manipuladas em ambiente Jupyter Notebook com uso da linguagem Python, por meio de bibliotecas como Pandas, NumPy, Matplotlib, Scikit-learn, entre outras, abrangendo variáveis agrárias, financeiras, demográficas e ambientais referentes ao Plano ABC+ em 2022. O pré-processamento incluiu padronização, exclusão de inconsistências, transformação de escalas e validação cruzada com fontes originais, assegurando a comparabilidade entre os estados. Além disso, a fim de garantir a reprodutibilidade dos experimentos, foi definida uma semente aleatória nos geradores das bibliotecas `random` e `NumPy`, assegurando consistência nos processos estocásticos e replicabilidade dos resultados.

A seleção das variáveis foi guiada por critérios conceituais, revisão da literatura e diretrizes técnicas do Plano ABC+, além de análise exploratória quanto à completude e relevância explicativa. As variáveis consideradas foram: (1) Emissões de CO₂ equivalente: representa a quantidade lançada na atmosfera de CO₂ pela agropecuária, em toneladas (emissoesCO2e); (2) Financiamentos do Plano ABC+: total de recursos financeiros alocados, em reais (totalFinanciado); (3) Área total financiada: extensão de terras beneficiadas pelo financiamento, em hectares (areaFinanciada); (4) População: descreve a quantidade de pessoas residentes na zona rural, em número de habitantes (populacao) e (5) Quantidade de contratos: representa o número de créditos bancários emitidos no Plano ABC+ (qtdContratos). Estes atributos compuseram a base dos modelos de otimização multiobjetivo empregados, voltados à maximização simultânea de eficiência econômica e impacto ambiental.

Todas as rotinas foram devidamente documentadas e estão disponíveis para reprodutibilidade no repositório:

<https://github.com/adalbertoAragao/Plano-ABC.git>

3.1. Análise Descritiva

Inicialmente, foi conduzida uma análise descritiva com o objetivo de compreender a distribuição dos dados, identificar padrões e levantar possíveis inconsistências nos registros (Tabela 1). Essa etapa permitiu obter uma visão panorâmica da aplicação dos recursos do Plano ABC+ e foi fundamental para subsidiar as decisões analíticas subsequentes. Essas informações estatísticas demonstram a variabilidade entre os estados, com emissões de CO₂ variando de 0,41 a 92,46 milhões de toneladas e financiamentos de 0 a 895,89 milhões de reais. Esses dados destacam desigualdades regionais e a necessidade de alocações mais equitativas.

Tabela 1. Estatísticas Descritivas dos Dados.

	emissoesCO2e (10 ⁶ t)	totalFinanciado (10 ⁶ R\$)	areaFinanciada (10 ³ ha)	populacao (10 ³ No)	qtdContratos (No)
contagem	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00
média	22.88	159.89	32.46	947.12	112.00
desv. padrão	24.03	235.17	53.97	814.03	151.50
mín	0.41	0.00	0.00	82.51	0.00
25%	4.12	3.83	0.59	338.01	2.00
50%	9.15	42.16	7.19	607.76	32.00
75%	35.53	267.51	38.64	1386.61	175.50
máx	92.46	895.89	244.77	3291.49	674.00

Os estados de Mato Grosso e Minas Gerais, por exemplo, concentram grande parte

dos financiamentos, assim como possuem elevadas emissões de CO₂e. Enquanto isso, observa-se estados que recebem menos ou nenhum recurso, a despeito de sua participação no impacto ambiental, evidenciando um desbalanceamento na alocação financeira do Plano ABC+ (Figura 1). Isso reforça a necessidade de políticas públicas mais equilibradas para uma distribuição justa dos recursos.

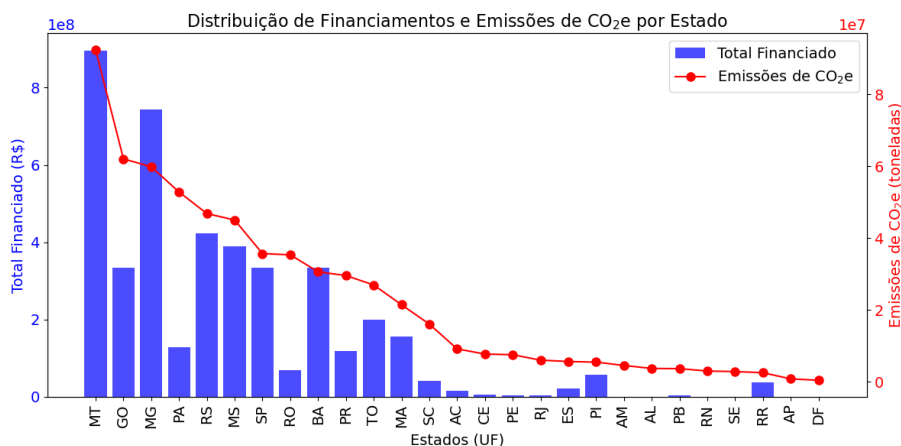


Figura 1. Distribuição de financiamentos e emissões de CO₂e por estado (2022).

3.2. Análise de Clusterização

A escolha pelo K-means se deveu à sua simplicidade computacional, interpretabilidade e ampla aplicabilidade em contextos exploratórios como o deste estudo, no qual se buscava uma segmentação preliminar dos entes federativos com base em seus padrões de financiamento e indicadores estruturais. A definição do número ótimo de *clusters* foi orientada pela análise da inércia intra-grupos em diferentes valores de *k*, por meio do método do “cotovelo”. A métrica de inércia foi escolhida em detrimento do coeficiente de silhueta, que se mostrou instável diante da presença de *outliers* e menos interpretável no contexto de comparação entre unidades federativas com grande heterogeneidade.

3.3. Análise de Regressão

O modelo de regressão Elastic Net foi adotado por sua robustez frente à multicolinearidade entre variáveis independentes e por sua capacidade de selecionar automaticamente os preditores mais relevantes. Ao combinar as penalizações L1 (*Lasso*) e L2 (*Ridge*), o modelo equilibra complexidade e parcimônia, sendo especialmente útil em bases com múltiplos indicadores regionais e financeiros interdependentes — como ocorre neste estudo. Essa flexibilidade torna o Elastic Net particularmente apropriado para análises exploratórias no contexto de políticas públicas, permitindo não apenas prever os valores de financiamento, mas também identificar os fatores com maior relevância explicativa, como as emissões de CO₂e e a população rural.

3.4. Modelos de Redistribuição de Recursos Financeiros no âmbito do Plano ABC+

A formulação dos modelos de redistribuição de recursos apresentados neste estudo tem como base princípios consolidados de proporcionalidade e justiça distributiva, frequentemente utilizados em políticas públicas brasileiras de natureza federativa. O objetivo foi

explorar cenários alternativos de alocação orçamentária para o Plano ABC+, respeitando o teto orçamentário praticado em 2022, mas testando critérios distintos de rateio entre as unidades da federação. A motivação para essa abordagem está diretamente ligada à busca por maior efetividade na aplicação de recursos voltados à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, aliada à consideração de aspectos estruturais das regiões, como sua área rural e população residente no campo. Para essa redistribuição de recursos financeiros, foram propostos quatro modelos:

O **Modelo 1 (M1)** alocou os financiamentos proporcionalmente às emissões de CO₂e de cada estado, respeitando o limite total de recursos disponíveis:

$$F_{\text{proporcional}} = \left(\frac{\text{Emissões do estado}}{\text{Emissões totais}} \right) \times F_{\text{total}} \quad (1)$$

onde $F_{\text{proporcional}}$ é o financiamento proporcional e F_{total} é o financiamento total.

O **Modelo 2 (M2)**, responsável por implementar o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II, foi construído com base nas diretrizes estabelecidas pela biblioteca DEAP (*Distributed Evolutionary Algorithms in Python*), amplamente adotada na literatura especializada para experimentos evolutivos. O objetivo central desse modelo foi simular uma alocação otimizada dos recursos financeiros do Plano ABC+, considerando simultaneamente dois critérios: a eficiência da aplicação (maior população beneficiada) e o impacto ambiental estimado (emissões de CO₂e evitadas). As soluções foram avaliadas com base na fronteira de Pareto [Verma et al. 2021].

Já os **Modelos 3 e 4 (M3 e M4)** combinaram o financiamento proporcional (M1) com ajustes baseados em regras de eficiência e impacto. O **M3** considerou a relação entre contratos e financiamentos para avaliar a resultante socioeconômica. O **M4**, por sua vez, integrou variáveis adicionais, como população rural e área financiada, ponderadas pelo financiamento proporcional, buscando uma análise mais abrangente dessa repercussão [M. Gilli 2008].

$$\text{Eficiência} = \left(\frac{F_{\text{inicial}}}{F_{\text{proporcional}}} \right) \quad (2)$$

onde F_{inicial} é o financiamento inicial e $F_{\text{proporcional}}$ é o financiamento proporcional.

Modelo 3:

$$\text{Impacto} = \left(\frac{\text{Contratos}}{F_{\text{proporcional}}} \right) \quad (3)$$

Modelo 4:

$$IS_i = w_1 \cdot \frac{\text{Contratos}_i}{F_{\text{proporcional}}} + w_2 \cdot \frac{\text{PopRural}_i}{F_{\text{proporcional}}} + w_3 \cdot \frac{\text{AreaFinanc}_i}{F_{\text{proporcional}}} \quad (4)$$

onde IS_i é o Impacto Social, PopRural_i é a População Rural e AreaFinanc_i é a Área Financiada. Os pesos atribuídos a cada variável são representados por w_1 , w_2 e w_3 .

4. Resultados Alcançados

A presente seção discute os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos modelos de redistribuição de recursos no âmbito do Plano ABC+, com base nos dados estruturados

e nos métodos previamente descritos. São analisados os efeitos comparativos das diferentes abordagens propostas — dos modelos baseados em proporcionalidade às soluções multiobjetivo —, destacando suas implicações na equidade federativa, na eficiência da alocação orçamentária e no alinhamento com as metas de mitigação de emissões. As análises visam oferecer subsídios técnicos e estratégicos para o aprimoramento da política pública.

4.1. Análise de Clusterização

A Figura 2 apresenta o resultado gerado pelo algoritmo K-Means, para os quais três *clusters* foram identificados, destacando agrupamentos regionais distintos de acordo com o financiamento e as emissões de CO₂ equivalente.

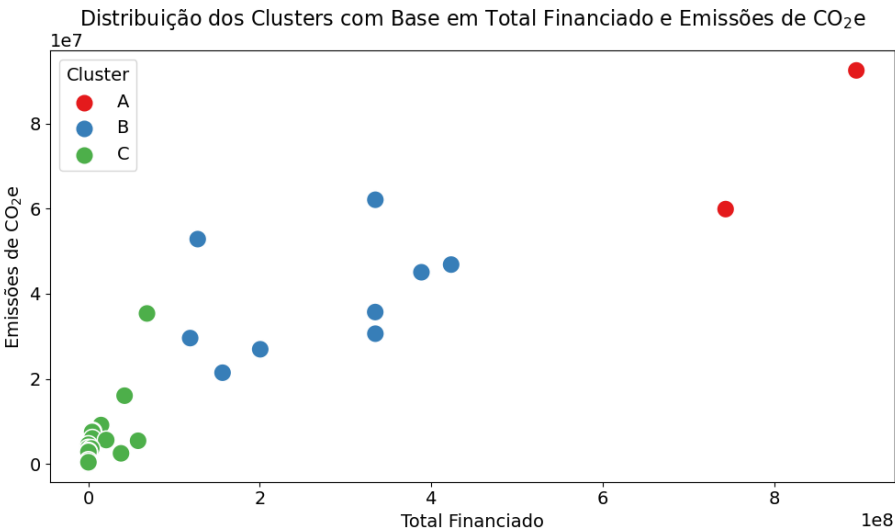


Figura 2. K-Means: análise de clusterização contendo as UF.

A Tabela 2 ratifica a visualização das informações na figura anterior, destacando os padrões distintos na alocação de recursos e as características socioeconômicas de cada *cluster*.

Tabela 2. Médias dos *Cluster* para as Variáveis Analisadas.

Cluster	emissoesCO2e (10 ⁶ t)	totalFinanciado (10 ⁶ R\$)	areaFinanciada (10 ³ ha)	populacao (10 ³ No)	qtdContratos (No)
A	76.17	819.63	177.66	1460.11	510
B	39.01	268.75	53.07	1376.64	189
C	7.15	16.19	2.72	641.40	18

Contudo, é importante ressaltar que o algoritmo K-means tende a apresentar limitações inerentes à sua aplicação, como a sensibilidade à escolha do número de *clusters* *k* e à inicialização aleatória dos centróides, fatores que podem influenciar a estabilidade dos resultados. Tais limitações foram mitigadas por meio da repetição do processo com diferentes sementes aleatórias e pela análise da consistência dos agrupamentos. Em síntese, a análise de clusterização permite direcionar as estratégias para priorização de determinados grupos com ações de mitigação dos GEE, aliadas a uma alocação financeira mais assertiva do ponto de vista social.

4.2. Análise de Regressão

As parametrizações do modelo Elastic Net seguiram boas práticas de modelagem estatística com regularização, sendo conduzidas por meio de uma busca em grade (*Grid-SearchCV*) para os hiperparâmetros de regularização *alpha* e razão de mistura *l1_ratio*. Essa busca variou α em uma escala logarítmica entre 0.001 e 10, e o *l1_ratio* entre 0.1 e 0.9, buscando o equilíbrio entre penalização e complexidade. A métrica de desempenho adotada como critério principal de avaliação foi o erro quadrático médio (*RMSE – Root Mean Squared Error*), dado seu caráter sensível a desvios extremos, o que é desejável neste contexto, no qual valores atípicos representam decisões orçamentárias significativas (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados do Modelo.

Métrica	Valor
Melhores Parâmetros	{'alpha': 0.01, 'l1_ratio': 1.0}
R ² (Treino)	0,9788
R ² (Teste)	0,9843
RMSE (Teste)	38,54

Adotou-se ainda a estratégia de validação cruzada K-Fold com $k=5$ para assegurar maior robustez na avaliação da capacidade de generalização do modelo, com divisão estratificada que preservou a representatividade dos perfis regionais segundo características socioeconômicas e ambientais. Os dados foram previamente normalizados e, em seguida, particionados em 80% para treinamento e 20% para teste, evitando vazamentos de informação e garantindo independência entre as amostras. Essa configuração permitiu maximizar o desempenho preditivo do modelo de regressão, mantendo a interpretabilidade estatística e reduzindo o risco de *overfitting*. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos, evidenciando a estabilidade e a precisão do Elastic Net como ferramenta aplicável à formulação de políticas públicas baseadas em dados.

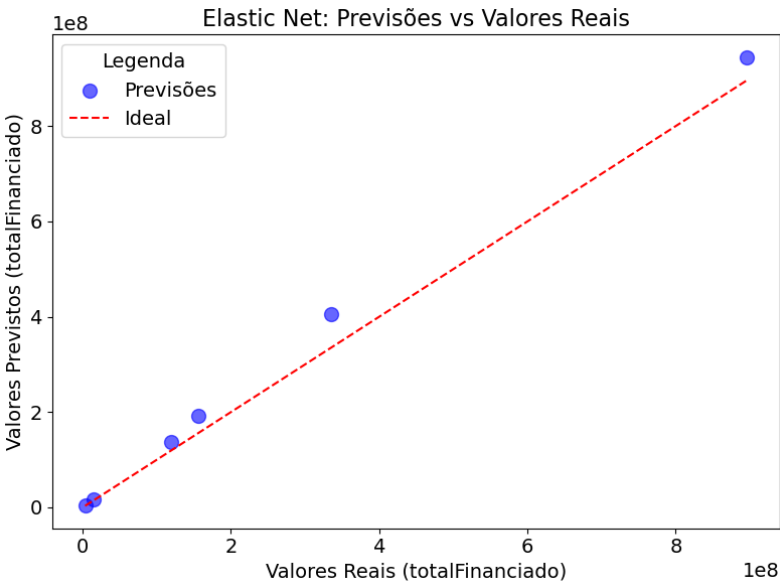


Figura 3. Valores previstos X Valores reais de financiamentos (Plano ABC+).

4.3. Modelos de Redistribuição de Recursos Financeiros no âmbito do Plano ABC+

O **Modelo 1** distribuiu os recursos de forma proporcional às emissões de CO₂e, oferecendo uma abordagem simples, transparente e alinhada aos objetivos climáticos do Plano ABC+. Essa estratégia favorece uma alocação equitativa entre os estados e estabelece uma base sólida para futuras adaptações metodológicas. Já o **Modelo 2**, baseado no algoritmo NSGA-II, embora tenha gerado soluções viáveis, não convergiu para uma fronteira de Pareto estabilizada — um reflexo da baixa variabilidade estrutural do problema, dado o número reduzido de combinações possíveis entre variáveis reais fortemente correlacionadas. Essa limitação, no entanto, não comprometeu os resultados, mas sim evidenciou a robustez do NSGA-II em cenários demasiadamente restritivos, conforme discutido por [Verma et al. 2021].

Por sua vez, os **Modelos 3 e 4** se basearam em critérios múltiplos, combinando a proporcionalidade de variáveis que refletem o impacto socioeconômico regionalizado. O **Modelo 4 (M4)**, em especial, integrou contratos efetivados, população rural e área financiada, resultando em uma distribuição mais sensível às disparidades territoriais. A metodologia adotou um índice ponderado com combinações definidas: 50% para as emissões de CO₂e (obtidos a partir do financiamento proporcional do **Modelo 1**) e 50% para critérios sociais, dos quais 90% foram orientados para a população rural (w_2), 5% para contratos (w_1) e 5% para área financiada (w_3). As variáveis foram normalizadas por min-max *scaling*, garantindo proporcionalidade na composição do índice, o qual pode ser ajustado conforme critérios estabelecidos pelos decisores políticos (Figura 4).

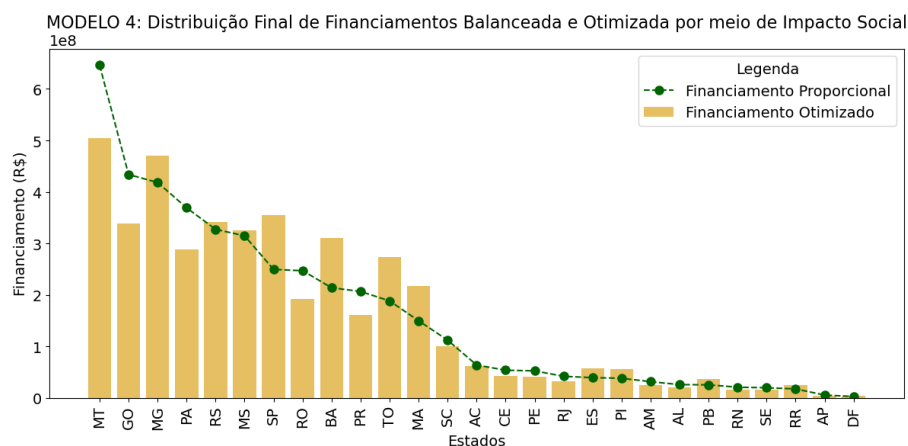


Figura 4. Modelo 4: Redistribuição de recursos financeiros (Plano ABC+).

A adoção de métodos heurísticos neste estudo está fundamentada na literatura especializada, em especial nas recomendações de [M. Gilli 2008], que destacam sua eficácia em contextos econômicos com múltiplas restrições e alta complexidade estrutural — cenário típico de problemas de alocação de recursos públicos. O **Modelo 4** representa uma contribuição relevante ao propor um índice composto que integra múltiplas dimensões da política pública, com potencial de adaptação a futuras reformulações do Plano ABC+.

A análise dos resultados revela uma tendência à redução das disparidades regionais em comparação ao cenário original. O **Modelo 1** privilegia estados com alta emissão de GEE, enquanto o **Modelo 2**, baseado na área rural, apresenta alocações menos coe-

rentes com o histórico de execução do plano. Já os Modelos 3 e 4 ampliam o número de estados contemplados e aproximam suas alocações, incluindo unidades federativas antes negligenciadas. O M4, em particular, apresenta uma distribuição mais equilibrada entre os *clusters* territoriais definidos pelo K-means, contemplando estados historicamente subfinanciados, como Ceará, Pernambuco e Rio de Janeiro, e evidenciando sua capacidade de promover equidade e eficiência federativa com base em múltiplos critérios. Os resultados desses modelos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de Financiamento por Estado.

UF	Cluster	totalFinanciado (10 ⁶ R\$)	M1 (10 ⁶ R\$)	M2 (10 ⁶ R\$)	M3 (10 ⁶ R\$)	M4 (10 ⁶ R\$)
Mato Grosso	A	895.89	646.08	247.29	501.79	504.13
Goiás	B	334.73	433.78	9.67	336.90	338.47
Minas Gerais	A	743.38	418.43	106.36	475.44	470.28
Pará	B	127.48	369.19	86.32	286.74	288.08
Rio Grande do Sul	B	423.13	327.39	284.82	345.88	342.12
Mato Grosso do Sul	B	388.48	314.79	261.70	330.26	325.98
São Paulo	B	334.59	249.45	345.04	358.96	355.38
Rondônia	C	68.30	247.15	33.62	191.95	192.85
Bahia	B	334.76	213.94	163.17	308.59	310.03
Paraná	B	118.67	206.73	11.52	160.56	161.31
Tocantins	B	200.42	188.37	84.55	271.70	272.97
Maranhão	B	156.47	149.87	195.44	216.18	217.18
Santa Catarina	C	42.16	112.19	10.26	100.58	101.07
Acre	C	14.70	63.97	76.90	61.48	61.43
Ceará	C	5.00	53.85	251.33	41.82	42.02
Pernambuco	C	4.37	52.59	210.75	40.85	41.04
Rio de Janeiro	C	4.53	42.03	85.25	32.64	32.80
Espírito Santo	C	20.75	39.40	227.89	56.83	57.09
Piauí	C	57.91	38.18	313.03	55.07	55.33
Amazonas	C	0.00	31.65	2.51	24.59	24.70
Alagoas	C	0.00	25.87	311.64	20.10	20.19
Paraíba	C	3.30	25.47	269.99	34.67	36.92
Rio Grande do Norte	C	0.00	20.87	131.59	16.21	16.28
Sergipe	C	0.00	19.79	60.13	15.37	15.44
Roraima	C	37.99	17.55	370.19	25.31	25.43
Amapá	C	0.00	5.57	130.17	4.33	4.35
Distrito Federal	C	0.00	2.87	35.87	2.23	4.16

A Tabela 5 sintetiza estatisticamente os cenários de redistribuição simulados, comparando o modelo original com as alternativas propostas (M1 a M4) por meio de métricas como média, desvio padrão e amplitude. Esses indicadores permitem avaliar o grau de concentração e dispersão dos recursos entre as unidades federativas, fornecendo uma base empírica para refletir sobre a eficácia distributiva de cada abordagem. Tal análise contribui para compreender o alinhamento metodológico dos modelos com os princípios de equidade regional e eficiência na alocação orçamentária.

Tabela 5. Resumo das métricas dos modelos.

(10 ⁶ R\$)	Média	Desvio Padrão	Amplitude (máx - mín)
Fin. Original	159,89	235,17	895,89
M1	159,89	167,95	643,21
M2	159,89	115,80	367,67
M3	159,89	157,78	499,56
M4	159,89	157,09	499,98

5. Conclusão

Este estudo destaca a relevância estratégica dos modelos de otimização multiobjetivo, combinados com heurísticas baseadas em regras, como ferramentas essenciais para aprimorar a eficiência e equidade na alocação de recursos financeiros do Plano ABC+. Os resultados evidenciam o potencial dessas técnicas para enfrentar as complexidades inerentes às diferenças regionais e econômicas, associadas à necessidade de práticas sustentáveis que contribuem para sistemas agrícolas mais resilientes, equilibrando assim objetivos ambientais e sociais de forma integrada. Portanto, essa abordagem orientada por dados oferece um suporte estratégico valioso aos formuladores de políticas públicas, permitindo priorizar iniciativas que maximizem os benefícios socioeconômicos, ao mesmo tempo que reduzem os impactos danosos ao meio ambiente de forma eficaz.

À medida que o Brasil avança em suas metas climáticas, esta pesquisa destaca a efetividade de programas ambientais implementados em larga escala. Neste contexto, o estudo, capaz de lidar com restrições complexas, contribui para a evolução do Plano ABC+, especialmente no que se refere à alocação estratégica de recursos. No futuro, será crucial aprimorá-lo e adaptá-lo a diferentes cenários políticos, garantindo respostas mais assertivas e eficientes. Assim, a integração dessas técnicas na agropecuária pode impulsionar uma ação climática alinhada aos objetivos globais de sustentabilidade.

Referências

- Brasil (2024). Lei nº 15.042, de 2024 - Criação do mercado regulamentado de carbono. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em 12 de dezembro de 2024.
- Gov, A. (2024). Cop29: como Brasil calculou sua nova meta de redução de gases de efeito estufa. Disponível em <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202411/cop29-como-brasil-calculou-sua-nova-meta-de-reducao-de-gases-de-efeito-estufa/>. Acesso em 12 de dezembro de 2024.
- M. Gilli, P. W. (2008). A review of heuristic optimization methods in econometrics. *Swiss Finance Institute Research Paper*, 08-12:1–47.
- MAPA (2023). *Plano ABC: Dez anos de sucesso e uma nova forma sustentável de produção agropecuária*. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo.
- Soares, T. C. and Cunha, D. A. d. (2019). Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no brasil. *Nova Economia*.
- Souza, M. C. O. and Corazza, R. I. (2017). Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa.
- Verma, S., Pant, M., and Snasel, V. (2021). A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems. *IEEE Access*, 9:57757–57791.