



DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE COMPOSTO TOPSIS-PrOPPAGA (ICTP) PARA SUPORTE À DECISÃO NO PROCESSO DE ESCOLHA DE SUPLEMENTAÇÃO BOVINA

DEVELOPMENT OF THE TOPSIS-PrOPPAGA COMPOSITE INDEX (ICTP) FOR DECISION SUPPORT IN THE SELECTION PROCESS OF BOVINE SUPPLEMENTATION

DESARROLLO DEL ÍNDICE COMPUESTO TOPSIS-PrOPPAGA (ICTP) PARA APOYO A LA DECISIÓN EN EL PROCESO DE SELECCIÓN DE SUPLEMENTACIÓN BOVINA

Nailhane Rodrigues Carvalho Santana ¹, Abdeladhim Tahimi ², Francisco Jácome Sarmento ³,
Eder Costa Cassetari ⁴, & Armando Dias Duarte ^{5*}

^{1,5} Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães (CMLM)

² Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrícolas (CECA/UFAL)

³ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

¹ nailhane.s1582@ufob.edu.br ² abdeladhim.tahimi@gmail.com ³ fjs@academico.ufpb.br ⁴ eder.cassetari@usp.br

^{5*} adduarte@ufob.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 21.02.2025

Aprovado: 29.04.2025

Disponibilizado: 02.06.2025

PALAVRAS-CHAVE: Suplementação bovina; Avaliação multicritério; Tomada de decisão agropecuária.

KEYWORDS: Cattle supplementation; Multicriteria evaluation; Agricultural decision-making.

PALABRAS CLAVE: Suplementación bovina; Evaluación multicriterio; Toma de decisiones agropecuarias.

*Autor Correspondente: Duarte, A. D.

RESUMO

As mudanças climáticas decorrentes de práticas não sustentáveis afetam biomas e comprometem a saúde humana e animal. Este estudo propõe o desenvolvimento do Índice Composto TOPSIS-PrOPPAGA (ICTP) como ferramenta de suporte à tomada de decisão na seleção de suplementos bovinos durante o período de escassez hídrica. A metodologia integra os métodos TOPSIS, que avalia a proximidade de alternativas em relação à solução ideal, e PrOPPAGA, que realiza a normalização dos critérios com base em suposições gaussianas. O estudo foi desenvolvido em uma fazenda de médio porte em Wanderley/BA, considerando critérios como custo, palatabilidade, disponibilidade, valor nutricional e prazo de entrega. O ICTP demonstrou que a alternativa A2 como a mais indicada pelos dois métodos. O estudo demonstra que a abordagem integrada é capaz de reduzir vieses, ampliar a robustez das decisões e adaptar-se a diferentes contextos agropecuários.

ABSTRACT

Climate change resulting from unsustainable practices affects biomes and compromises human and animal health. This study proposes the development of the TOPSIS-PrOPPAGA Composite Index (ICTP) as a tool to support decision-making in the selection of bovine supplements during periods of water scarcity. The methodology integrates the TOPSIS method, which assesses the proximity of alternatives to the ideal solution, and PrOPPAGA, which normalizes the criteria based on Gaussian assumptions. The study was developed on a medium-sized farm in Wanderley/BA, considering criteria such as cost, palatability, availability, nutritional value and delivery time. The ICTP demonstrated that alternative A2 was the most indicated by both methods. The study demonstrates that the integrated approach can reduce biases, increase the robustness of decisions and adapt to different agricultural contexts.

RESUMEN

El cambio climático resultante de prácticas insostenibles afecta los biomas y compromete la salud humana y animal. Este estudio propone el desarrollo del Índice Compuesto TOPSIS-PrOPPAGA (ICTP) como herramienta para apoyar la toma de decisiones en la selección de suplementos bovinos durante períodos de escasez hídrica. La metodología integra el método TOPSIS, que evalúa la proximidad de las alternativas a la solución ideal, y PrOPPAGA, que normaliza los criterios con base en supuestos gaussianos. El estudio se desarrolló en una granja mediana en Wanderley/BA, considerando criterios como costo, palatabilidad, disponibilidad, valor nutricional y tiempo de entrega. El ICTP demostró que la alternativa A2 fue la más indicada por ambos métodos. El estudio demuestra que el enfoque integrado es capaz de reducir sesgos, aumentar la robustez de las decisiones y adaptarse a diferentes contextos agrícolas.



INTRODUÇÃO

A produção de produtos agrícolas e alimentícios é parte integrante da economia global, que influencia a dinâmica comercial, a segurança alimentar e o crescimento econômico. Essa multiplicidade abrange vários aspectos, desde o comércio internacional até práticas sustentáveis. O impacto da agricultura no PIB global é ainda mais substancial, pois também apoia indústrias, como a fabricação de alimentos e bebidas, que dependem de recursos agrícolas para suas operações (Matos et al., 2024).

Conforme relatado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), cerca de 1,3 bilhão de pessoas dependem da pecuária, cuja contribuição proteica é de extrema importância para uma dieta saudável. Em 2022, a fome afetou entre 691 e 783 milhões de pessoas, enquanto a insegurança alimentar atingiu cerca de 900 milhões (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes, 2023).

Com o crescimento populacional, estima-se que até 2050 o mundo tenha mais de 2 bilhões de habitantes, oriundos de países em desenvolvimento. Nesse cenário, o Brasil tem o papel de um dos maiores produtores e exportadores agrícolas, em especial do setor de carnes, devido ao seu vasto território e boas condições climáticas. A pecuária brasileira fornece carne bovina de alta qualidade para mais de 150 países, o que contribui significativamente para a segurança alimentar global (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes, 2022).

A projeção do consumo mundial de carne bovina atinja 81 milhões de toneladas de peso equivalente de carcaça (Mt cwe) na próxima década, sendo estável em cerca de 6 kg *per capita* (rwe) entre 2024 e 2033 (Agricultural Outlook, 2024). No ano de 2022, o setor do agronegócio de carne bovina no Brasil gerou R\$ 1,02 trilhão, com destaque para o ramo do varejo (R\$ 304,33 bilhões), a indústria (R\$ 250,56 bilhões) e a pecuária (R\$ 241,38 bilhões), essas exportações atingiram 2,26 milhões de toneladas, representando um aumento de 22,6% em relação a 2021 e gerando US\$ 12,97 bilhões em receita (crescimento de 40,8%) com impacto positivo de US\$ 3,7 bilhões na balança comercial (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes, 2023). O Produto Interno Bruto (PIB) do setor foi de US\$ 198,12 bilhões, o que representou 41,6% do PIB do agronegócio e 10% da riqueza nacional (R\$ 9,9 trilhões) (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes, 2023).

A sustentabilidade da bovinocultura de corte está associada às economias de escala, frente às margens de lucro estreitas, nesse sentido a escassez hídrica é um dos principais entraves da produção pecuária, sobretudo em regiões com limitação hídrica sazonal, afetando diretamente a qualidade das pastagens e o desempenho animal (Ngxumeshe et al., 2020; Palhares; Morelli & Novelli, 2021; Sawalhah et al., 2021; Rodrigues Junior & Dziedzic, 2021; Zhang et al., 2022; Menendez et al., 2023; Maomé; Yousefi & Mahmoudi Aznaveh, 2024). Nessas condições, a suplementação alimentar torna-se uma estratégia indispensável para manter a produtividade e o bem-estar animal, ao mesmo tempo em que enfrenta os desafios da agricultura sustentável (Spers et al., 2024). Essa estratégia é alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), através do ODS 2 (Fome Zero), que busca erradicar a fome e promover a agricultura sustentável, e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), voltado ao uso eficiente dos recursos e à redução do desperdício, contribuindo para sistemas alimentares mais sustentáveis e resilientes.

DEMANDAS POR CARNE BOVINA BRASILEIRA

No ano de 2022, cerca de 18,2% dos bovinos abatidos no Brasil vieram de confinamento, enquanto a maioria foi criada em sistemas de pastagem extensiva. Aproximadamente 71,48% da carne bovina produzida foi consumida internamente, resultando em um consumo *per capita* de 36,73 kg, considerando todos os níveis de fiscalização, inclusive o mercado informal. Já em 2023, a produção brasileira de carne bovina atingiu um recorde, com um acréscimo de 900 mil toneladas em relação a 2022, o que representa 25,7% da produção nacional (Fiumaro et al., 2024).

Nas últimas décadas, a pecuária nacional aumentou sua eficiência, por meio da alta produtividade por animal e por área (Hamid et al., 2023; Santos et al., 2024). Esse avanço está relacionado à adoção de tecnologias agrícolas de baixo carbono e à implementação de práticas sustentáveis, como a recuperação de pastagens degradadas e os sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (ILPF), que permitem maior produção com menor uso de recursos e redução das emissões por quilo de carne (Kearney et al., 2023; Wang et al., 2024; Henn et al., 2024). Esse aumento da participação da carne bovina na balança comercial brasileira, reforça sua importância estratégica para a economia nacional (Associação Brasileira dos Exportadores de Carnes, 2023).

O PAPEL DOS MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

Os Métodos de Decisão Multicritério (MCDM) auxiliam tomadores de decisão em contextos com múltiplas alternativas e critérios, buscando a melhor combinação entre eles (Antony Kevin & Arokiaprakash, 2024). Para ampliar a eficácia da análise, é recomendado iniciar pela fase de Métodos de Estruturação de Problemas (PSM), vinculada à Pesquisa Operacional Soft, com foco na compreensão do problema e na escuta ativa da Voz do Cliente (Gomes Júnior & Schramm, 2022). A estrutura do PSM engloba várias expectativas da solução final, incluindo: a) Escolha ($P\alpha$); b) Categorização ($P\beta$); c) Coordenação ($P\gamma$); d) Descrição ($P\delta$) e rejeição absoluta ($P\beta^0$) (Sarah et al., 2014; Ohlsson & Han, 2018; Cunha & Morais, 2019). Cada aspecto desempenha um papel crucial na melhoria dos processos de tomada de decisão.

A seleção do PSM depende tanto do tipo de solução esperada quanto da familiaridade do analista, visto que não há método universal. Dentre as abordagens disponíveis estão o SSM, SODA, SCA e VFT, que podem ser complementadas com ferramentas como modelagem qualitativa, estruturação de problemas, mapas cognitivos, dinâmicas de grupo e prospecção de cenários (Gomes Junior & Schramm, 2021). Nessa fase, é essencial considerar o fator humano, selecionar tecnologias adequadas, envolver equipes multidisciplinares e contar com a atuação de um facilitador. O objetivo é alcançar uma visão holística e formular recomendações que conduzam da situação-problema à situação desejada (Cunha & Morais, 2019).

MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO PARA O SETOR DO AGRONEGÓCIO

O uso de tecnologias de suporte à decisão baseadas em dados, como modelos preditivos e simulações, tem revolucionado o setor agrícola ao gerar *insights* que aumentam a produtividade e promovem a sustentabilidade por meio da análise de dados provenientes de sensores e imagens de satélite (Blessy, 2024; Raji, Ijomah & Eyieyen, 2024). Esses métodos são essenciais para enfrentar os desafios globais da agricultura moderna (como mudanças climáticas, escassez de recursos e insegurança alimentar) ao promover práticas mais eficientes



e de menor impacto ambiental. Esses métodos abrangem aspectos como seleção de culturas, planejamento de colheita e manejo integrado de pragas, promovendo práticas agrícolas sustentáveis (Permono & Kurniati, 2024; Duarte, 2024; Cruz et al., 2025). Avaliar decisões sob incertezas permite reduzir riscos e aumentar a adaptabilidade frente às mudanças (Gheddar, 2023).

No caso da suplementação alimentar bovina, os métodos multicritério auxiliam na avaliação de fatores como características do gado, composição química da ração e prevenção de doenças, especialmente diante da variação sazonal das pastagens (Spers et al., 2024). Modelos como os de árvore de decisão vêm sendo aplicados para recomendar programas nutricionais conforme o estágio de crescimento dos animais (Noinan et al., 2022), permitindo que produtores tomem decisões mais informadas (Uyeh et al., 2019). Nesse contexto, este estudo propõe o uso combinado do Método de Prioridade Observada Baseado na Presunção Gaussiana de Alternativas (PrOPPAGA) com o método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) para apoiar a seleção de suplementos durante períodos de escassez hídrica, em uma fazenda de médio porte no município de Wanderley, Bahia, por meio do Índice Compósito TOPSIS–PrOPPAGA (ICTP).

O MÉTODO TOPSIS

O método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) foi desenvolvido por Hwang e Yoon (1981) e consiste em uma técnica de apoio multicritério à decisão que visa selecionar a melhor alternativa com base na proximidade relativa a uma solução ideal. O princípio fundamental do método é que a alternativa mais adequada deve estar simultaneamente mais próxima da solução ideal positiva (*Positive Ideal Solution* - PIS), que reúne os melhores valores para cada critério analisado, e mais distante da solução ideal negativa (*Negative Ideal Solution* - NIS), que representa os piores valores possíveis (Hwang et al., 1981). Os critérios de decisão utilizados no método TOPSIS podem ser classificados em qualitativos e quantitativos. Os critérios quantitativos são subdivididos em: (a) Monotônicos de ganho: onde um maior valor indica melhor desempenho; e b) Monotônicos de custo: onde um menor valor indica melhor desempenho.

Após a seleção dos critérios e alternativas, são atribuídos pesos aos critérios, refletindo sua relevância no processo decisório. O método de ponderação pode variar, sendo comum a atribuição de pesos subjetivos por especialistas ou a utilização de métodos estruturados, como o método de Simos ou SWING (Yang & Chou, 2005; Cruz et al., 2025). A matriz de decisão é organizada da seguinte maneira:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Em que x_{ij} , representa o desempenho da alternativa i no critério j .

A normalização da matriz de decisão é realizada utilizando a técnica da normalização vetorial, conforme a equação a seguir (Equação 2):



$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (1)$$

Em que r_{ij} , representa o valor normalizado da alternativa i no critério j.

A matriz normalizada é então ponderada de acordo com os pesos atribuídos aos critérios:

$$p_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (2)$$

O termo w_j representa o peso do critério j.

A solução ideal positiva A^+ e a solução ideal negativa A^- são definidas como:

$$A^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+) \quad (3)$$

$$A^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-) \quad (4)$$

$$p_j^+ = \begin{cases} \max_i(p_{ij}), & \text{se o critério é de benefício} \\ \min_i(p_{ij}), & \text{se o critério é de custo} \end{cases}$$

$$p_j^- = \begin{cases} \min_i(p_{ij}), & \text{se o critério é de benefício} \\ \max_i(p_{ij}), & \text{se o critério é de custo} \end{cases}$$

O Cálculo dos vetores de peso normalizados, nessa etapa é realizada medida de separação, para cada observação p_{ij} em relação as soluções ideal e anti-ideal conforme as Equações cinco e seis:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij} - p_j^+)^2} \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij} - p_j^-)^2} \quad (6)$$

O índice de similaridade de cada alternativa é dado por:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (7)$$

O coeficiente de proximidade, calculado conforme a equação 7, indica o quanto próxima uma alternativa está da solução ideal. Quanto mais esse valor se aproxima de 1, maior é a similaridade da alternativa em relação à solução ideal, ou seja, ela é considerada mais desejável. Por outro lado, quanto mais o valor se aproxima de 0, mais distante a alternativa está da solução ideal, indicando um desempenho inferior em relação aos critérios avaliados.

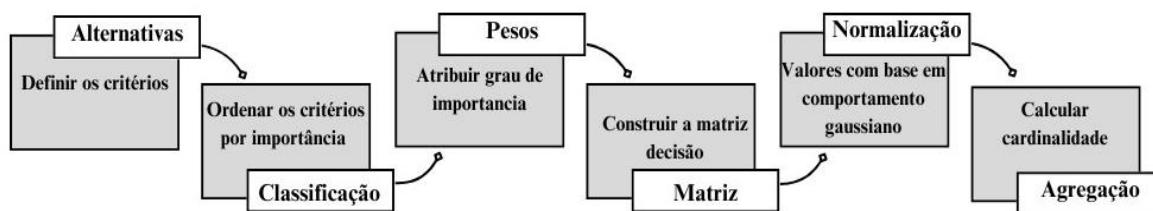
O MÉTODO PROPPAGA

A técnica do método PrOPPAGA envolve agregação e síntese que se destaca por normalizar os valores dos atributos das alternativas, assumindo que esses atributos seguem uma

distribuição gaussiana dentro dos mesmos critérios (Santos & Santos, 2022). É importante ressaltar que para aplicar o PrOPPAGA não é necessário realizar testes de qualidade de ajustes para verificar a conformidade com o comportamento gaussiano, pois o objetivo do método não é realizar análises probabilísticas. Em vez disso, o método se concentra exclusivamente na normalização, usando o valor médio dos atributos como referência.

De acordo com Drumond et al. (2021), a metodologia PrOPPAGA foi projetada e desenvolvida para ser simples e eficaz na aplicação em comparação com outros métodos de análise multicritério (Figura 1). A metodologia é muito aplicada nos setores militar e logístico (Santos, 2021; Santos & Pellanda, 2021; Salgado et al., 2023; Souza, 2023).

Figura 1. Abordagem metodológica do método PrOPPAGA



Na fase de definição dos critérios, Santos e Santos (2022) enfatizam que os critérios de tomada de decisão podem ser classificados como qualitativos ou quantitativos. Nesse sentido, Entani (2023) complementa que os critérios qualitativos são representados por dados linguísticos subjetivos, enquanto os quantitativos são expressos por dados numéricos objetivos. Essa classificação é essencial para a compreensão dos diversos tipos de critérios envolvidos em um problema decisório. O(A) tomador(a) de decisão também pode indicar indiferença entre dois ou mais critérios, o que significa que eles podem atribuir igual importância a eles. A determinação dos pesos dos critérios, que corresponde às três primeiras etapas do PrOPPAGA, é feita por meio de uma adaptação do método do cartão proposto por Simos (1989).

Inicialmente, o grau máximo de importância (S_j)_{máximo}, é determinado de acordo com a seguinte relação:

$$(S_j)_{máximo} = \begin{cases} n, & \text{se } n > 7 \\ 7, & \text{se } n \leq 7 \end{cases}$$

Os graus de importância devem ser atribuídos aos outros critérios de acordo com a ordem estabelecida, e não precisam ser sequenciais. Para os critérios qualitativos Santos e Santos (2022) propõem a seguinte pontuação (Tabela 1).

Tabela 1. Pontuações dos graus de importância

Pontuação	Grau de importância
7	A alternativa excede todas as expectativas para este critério
6	A alternativa atende às demandas muito acima das expectativas
5	A alternativa atende às demandas ligeiramente acima das expectativas
4	A alternativa atende às demandas dentro do esperado
3	A alternativa atende às demandas ligeiramente abaixo do esperado
2	A alternativa atende às demandas muito abaixo do esperado
1	A alternativa não atende às demandas

Fonte: Santos & Santos (2022).

O peso de cada critério é então calculado usando uma média ponderada simples dos valores atribuídos. Após a determinação dos pesos dos critérios, é necessário avaliar o desempenho das alternativas relacionadas a esses critérios por meio da Matriz de Decisão, que é definida da seguinte forma:

<i>Alternativas</i>	<i>Critérios 1</i>	<i>Critérios 2</i>	...	<i>Critérios n</i>
<i>Alternativa 1</i>	d_{11}	d_{12}	...	d_{1n}
<i>Alternativa 2</i>	d_{21}	d_{22}	...	d_{2n}
:	:	:	d_{ij}	:
<i>Alternativa m</i>	d_{m1}	d_{m2}	...	d_{mn}

A normalização proposta pelo método envolve o cálculo da média e do desvio padrão dos valores de desempenho para cada coluna (critério) na Matriz de Decisão. Esses parâmetros são essenciais para definir uma curva gaussiana, que tem a propriedade interessante de que a área sob qualquer curva gaussiana é igual a 1. A normalização é realizada por meio da atribuição de uma pontuação entre 0 e 1 a cada alternativa dentro de um critério específico. Se alguns desses critérios forem monotônicos de custo, os valores de desempenho das alternativas serão multiplicados por (-1) na Matriz de Decisão (Santos & Santos, 2022).

Na fase de agregação, os valores e pesos normalizados de cada critério são usados para realizar a agregação, resultando na cardinalidade de cada alternativa. A cardinalidade representa o valor associado a cada alternativa e é usada para classificá-las. Quanto maior a cardinalidade, melhor a alternativa (Equação 8).

$$v_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot p_{ij} \quad (8)$$

Onde v_i são os valores da cardinalidade, w_j os pesos para cada critério e p_{ij} os valores normalizados.

METODOLOGIA

Este estudo é caracterizado como um estudo de caso por permitir uma análise aprofundada de um fenômeno específico dentro de seu contexto da vida real, normalmente envolvendo uma investigação detalhada de casos individuais, como políticas ou indivíduos, para obter *insights* mais amplos (Brough, 2024). O estudo foi realizado com o objetivo de auxiliar um pecuarista de médio porte da cidade de Wanderley, localizada no Oeste da Bahia, no processo de decisão da escolha do suplemento bovino mais adequado para o período de escassez hídrica. Essa escassez, impacta diretamente a disponibilidade e qualidade dos pastos, tornando a suplementação nutricional essencial para manter o desempenho produtivo do rebanho. Assim, a escolha do suplemento ideal torna-se um fator estratégico para minimizar os impactos negativos da restrição hídrica na alimentação animal (Cardoso et al., 2022; Spers et al., 2024). Atualmente, o pecuarista conta com seis opções de suplementos fornecidos por um único fornecedor. Embora a suplementação bovina ocorra em diversas outras situações (como nas fases de crescimento dos animais, períodos de excesso de chuvas ou diante de solos com deficiência nutricional), optou-se por esse recorte por sua relevância prática e que para

o agricultor, representa um dos maiores desafios no manejo alimentar do rebanho, sem restringir a aplicabilidade da abordagem a esse único cenário.

A escolha dos métodos, se justificam pela necessidade de uma abordagem que simplifique o processo de decisão sem comprometer a precisão dos resultados. O PrOPPAGA, por ser um método recente, agrupa valor ao processo decisório ao propor uma normalização baseada em distribuições gaussianas, o que favorece a padronização criterial em cenários com alta variabilidade. Sua integração com o método TOPSIS, que avalia a proximidade das alternativas em relação à solução ideal, permite uma análise mais equilibrada e adaptável, especialmente em contextos agropecuários marcados por múltiplos critérios e incertezas. Métodos consagrados, como AHP, TOPSIS e PROMETHEE II, muitas vezes, apresentam ordens diferentes de priorização, tornando essencial uma análise criteriosa dos resultados. Além disso, a combinação desses métodos se apresenta como promissores para o processo de tomada de decisão como, por exemplo, o *Balanced Decision-Making Method* (BDMM) (Cruz et al., 2025).

Os critérios de seleção foram baseados em consultas com artigos científicos e duas zootecnistas que trabalham na região auxiliando os(as) produtores(as) (Tabela 2).

Tabela 2. Matriz de Critérios

Critérios	Legenda	Descrição	Unidade de medida	Fonte consultada
C1	Custo	Refere-se ao valor monetário necessário para comprar o suplemento animal. Trata-se de analisar quanto será pago pelo suplemento em termos financeiros, considerando o custo-benefício para a nutrição do rebanho	Saco de R\$/30Kg	Pereira & Carvalho (2025) e as condições do mercado local
C2	Palatabilidade	Está relacionada à aceitação do sabor e textura do suplemento bovino para os animais, influenciando diretamente na aceitação e consumo voluntário pelos bovinos	Escala de 1 a 7 (1 = menos aceito, 7 = mais aceito)	Silva Sena et al. (2024) e Araújo & Costa (2024)
C3	Disponibilidade	Refere-se à facilidade e regularidade com que o suplemento bovino pode ser encontrado e adquirido no mercado, de distribuidores ou fornecedores especializados, garantindo seu uso contínuo na dieta de animais	Escala de 1 a 7 (1 = menos disponível, 7 = mais disponível)	Condições do mercado local
C4	Valores nutricionais	Refere-se à composição dos nutrientes presentes no suplemento bovino, como proteínas, vitaminas, minerais e outros elementos que contribuem para a saúde, crescimento e desempenho produtivo dos animais	Escala de 1 a 7 (1 = baixo valor nutricional, 7 = maior valor nutricional)	Silva Morais (2001); Giacomel et al. (2022); Vilela et al. (2024)
C5	Prazo de entrega	Refere-se ao período necessário entre o pedido do suplemento bovino e o momento em que é entregue ao comprador	Dias	Condições do mercado local

Para estabelecer o critério C1 (custo), foi considerado o estudo de Pereira e Carvalho (2025) que analisaram a influência do custo da suplementação alimentar nos custos operacionais. Além disso, foi consultado os valores médios (R\$) disponibilizados pelo fornecedor. O critério C2 (Palatabilidade) foi baseado nos estudos de Silva Sena et al. (2024), que investigaram as preferências sobre determinados alimentos na criação de gado e a relação com qualidade da carne (Araújo & Costa, 2024). A disponibilidade (C3) foi determinada com base nas condições apresentadas pelo fornecedor. Os valores nutricionais (C4) foram considerados a partir de estudos que destacam a importância de uma adequada composição de nutrientes (Silva



Morais, 2001; Giacomel et al., 2022; Vilela et al., 2024). Por fim, o Prazo de entrega (C5) foi definido pelas condições de mercado.

A escala proposta por Santos e Santos (2022) foi adaptada ao contexto dos pesos da pesquisa e descrita pelo pecuarista com base em suas próprias necessidades e prioridades (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de pesos

Pesos atribuídos	C1	C2	C3	C4	C5
P1	7	6	5	7	4

Os pesos atribuídos ao agricultor indicam uma clara priorização de Custo (C1) e Valores Nutricionais (C4), ambos recebendo o maior peso de 7. Isso mostra que o agricultor está focado em equilibrar a eficiência financeira com a necessidade de um suplemento de alta qualidade que apoie a saúde, o crescimento e a produtividade do gado. A palatabilidade (C2), com peso 6, também é um fator significativo, pois o produtor reconhece a importância de o suplemento ser bem aceito pelos bovinos para garantir consumo e desempenho adequados. A disponibilidade (C3) e o prazo de entrega (C5), ponderados em 5 e 4, respectivamente, são de importância moderada. O agricultor valoriza a disponibilidade consistente do suplemento, mas está menos preocupado com a entrega rápida, provavelmente devido ao estabelecimento de cadeias de suprimentos. No geral, a tomada de decisão do agricultor reflete uma ênfase estratégica em encontrar um suplemento econômico e nutricionalmente equilibrado que o gado consumirá de bom grado, enquanto as considerações logísticas, embora importantes, têm uma prioridade um pouco menor (Tabela 4).

Tabela 4. Matriz de decisão

Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5
A1	74,99	5	5	4	10
A2	115,50	5	6	5	5
A3	120,50	4	6	7	7
A4	89,0	5	5	3	8
A5	84,0	6	3	3	10
A6	110,0	4	4	5	7

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizada a ferramenta computacional especializada, disponível pelo endereço eletrônico: www.proppaga.com.br (Santos & Santos, 2022) (Tabela 5).

Tabela 5. Matriz de desempenho

Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5
A2	-115,5	5	6	5	-5
A1	-74,99	5	5	4	-10
A3	-120,50	4	6	7	-7
A4	-89	5	5	3	-8
A5	-84	6	3	3	-10
A6	-110	4	4	5	-7
Média	-98,998	4,833	4,833	4,5	-7,833
Desvio padrão	17,112	0,687	1,067	1,384	1,771

A alternativa A2 é a mais bem avaliada, com cardinalidade de 0,597 (Tabela 5), sugerindo que atende melhor aos critérios estabelecidos pelo pecuarista. Isso indica que a alternativa A2 oferece o desempenho mais equilibrado em fatores importantes, como custo (C1) e outros critérios qualitativos, como disponibilidade (C3) e valores nutricionais (C4). A alternativa A1,

com cardinalidade de 0,544, segue de perto, apresentando forte desempenho, provavelmente devido ao seu preço competitivo e conteúdo nutricional razoável, embora ligeiramente inferior ao A2 em termos de eficiência geral. As alternativas A3 (0,524) e A4 (0,491) possuem classificações intermediárias, indicando que são moderadamente eficazes em atender aos critérios do pecuarista, mas podem ficar aquém em alguns aspectos, como palatabilidade (C2) ou tempo de entrega (C5). A5 e A6, com cardinalidades de 0,449 e 0,372, respectivamente, são as opções menos preferidas, provavelmente devido a custos mais elevados ou menor valor nutricional percebido. Essas alternativas podem oferecer relações custo-benefício menos favoráveis ou apresentar desafios logísticos, tornando-as escolhas menos atraentes para o pecuarista.

Tabela 5. Resultados de cardinalidade das melhores alternativas

Alternativas	Cardinalidade
A2	0,597
A1	0,544
A3	0,524
A4	0,491
A5	0,449
A6	0,372

APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS

Para garantir a consistência da análise, foi utilizada a mesma matriz de decisão (Tabela 4) e a matriz de pesos (Tabela 3). No entanto, na definição dos pesos, foi aplicada à Técnica de Ponderação de Oscilação (SWING), desenvolvida por Von Winterfeldt e Edwards (1993). Essa técnica determina os fatores de ponderação de forma indireta, por meio de uma comparação sistemática entre os atributos, baseada na importância relativa de suas variações incrementais. Inicialmente, os atributos são ordenados conforme o impacto que a melhoria de seu nível (do pior para o melhor) exerce sobre a decisão. Em seguida, um atributo de referência é selecionado, e os demais são comparados em relação a ele. Os pesos são então calculados como a razão entre os pontos atribuídos a cada atributo e o total de pontos distribuídos, garantindo sua normalização para que a soma total seja igual a 1 ou 100%. A seguir, a Tabela 6 apresenta os resultados do TOPSIS, demonstrando os índices de proximidade (ξ_i) calculados para cada alternativa e permitindo a comparação entre as opções analisadas.

Tabela 6. Resultados do método TOPSIS

Alternativas	ξ_i
A3	0,623
A2	0,543
A1	0,441
A6	0,411
A4	0,345
A5	0,331

Após a aplicação do método TOPSIS, os resultados indicaram que a alternativa A3 apresentou o melhor desempenho, com um índice $\xi_1 = 0,623$, sendo a opção mais próxima da solução ideal de acordo com esse método. A alternativa A2 também teve um bom desempenho, ocupando a segunda posição com $\xi_2 = 0,543$, enquanto a alternativa A1, que havia se destacado no PrOPPAGA, ficou na terceira posição com $\xi_3 = 0,441$. A alternativa A6 teve um desempenho intermediário, com índice de $\xi_4 = 0,411$, já a alternativa A4 ficou em penúltimo

com $\xi_5 = 0,345$, enquanto a alternativa A5 obteve o menor índice ($\xi_6 = 0,331$), indicando menor adequação ao conjunto de critérios avaliados.

A diferença nos resultados entre os métodos PrOPPAGA e TOPSIS ocorre devido às diferentes abordagens matemáticas utilizadas por cada um para classificar as alternativas. O PrOPPAGA avalia as opções com base em um modelo de cardinalidade que pondera os critérios diretamente, enquanto o TOPSIS determina a melhor alternativa considerando a proximidade da solução ideal e a distância da pior solução possível.

No método PrOPPAGA, a alternativa A2 foi a mais bem classificada, indicando um equilíbrio entre os critérios mais valorizados pelo pecuarista. No entanto, no TOPSIS, essa alternativa apresentou um desempenho inferior em relação à alternativa A3, ocupando a segunda posição com um índice $\xi_2 = 0,543$. Por outro lado, a alternativa A3, que no PrOPPAGA estava na terceira posição, apresentou o maior índice no TOPSIS ($\xi_3 = 0,623$), sendo apontada como a mais próxima da solução ideal segundo esse método.

A alternativa A1, que teve um bom desempenho no PrOPPAGA, ocupando a segunda posição com uma cardinalidade de 0,544 manteve-se bem classificada no TOPSIS, embora tenha ficado na terceira posição com um índice $\xi_3 = 0,441$. Já a alternativa A6, que no PrOPPAGA havia apresentado o menor desempenho (0,372), teve uma melhora relativa no TOPSIS, alcançando a quarta posição com $\xi_4 = 0,411$. A alternativa A4, que estava em posição intermediária no PrOPPAGA (0,491), teve um desempenho inferior no TOPSIS, ocupando apenas a quinta posição com $\xi_5 = 0,345$. Por fim, a alternativa A5, que já havia sido a penúltima colocada no PrOPPAGA (0,449), ficou na última posição no TOPSIS ($\xi_6 = 0,331$), o que demonstra a sua menor adequação.

DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE COMPOSTO TOPSIS-PROPPAGA (ICTP)

Dada a variação encontrada nos *rankings* dos dois métodos estudados, foi desenvolvido o Índice Composto TOPSIS-PrOPPAGA (ICTP), cujo índice é calculado como a média ponderada dos valores normalizados de cada método, descritos pela Equação abaixo.

$$ICTP = w_1 \times T' + w_2 \times P' \quad (9)$$

Onde w_1 e w_2 são os pesos relativos ao grau de importância de cada método. Para normalizar os escores do TOPSIS e do PrOPPAGA, a seguinte transformação foi utilizada:

$$T' = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (10)$$

$$P' = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (11)$$

T' e P' são os valores normalizados, T_{min} e P_{min} são os valores mínimos dos respectivos métodos e T_{max} e P_{max} os valores máximos respectivamente. Para o presente estudo, foram adotados os pesos iguais para os dois métodos, o que representa igual importância (Tabela 7).

Tabela 7. Resultados do ICTP

Alternativa	T' (normalizado)	P' (normalizado)	ICTP
A2	0,725	1,000	0,863
A3	1,000	0,674	0,837
A1	0,377	0,763	0,570
A4	0,048	0,529	0,289
A5	0,000	0,342	0,171
A6	0,274	0,000	0,137

De acordo com o ICTP, a alternativa A2 tem o maior valor (0,863), confirmando que é a alternativa mais equilibrada entre os dois métodos. A3 também se destaca, liderando no TOPSIS e ficando bem-posicionada no PrOPPAGA. A1 apresenta um bom desempenho global, ficando na terceira posição. A4 e A5 têm desempenhos intermediários, enquanto A6 é a opção menos desejável, com o menor valor de ICTP.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento e aplicação do Índice Composto TOPSIS-PrOPPAGA (ICTP) demonstrou potencial para qualificar a tomada de decisão na escolha de suplementos bovinos durante períodos de escassez hídrica. A integração dos métodos TOPSIS e PrOPPAGA permitiu mitigar limitações individuais de cada abordagem, resultando em uma análise mais balanceada entre critérios objetivos e subjetivos. Contudo, apesar da contribuição metodológica, o estudo apresenta limitações que devem ser reconhecidas. A análise foi conduzida com base em um único tomador de decisão e um número restrito de alternativas, o que pode comprometer a generalização dos resultados. Além disso, os pesos atribuídos aos critérios refletem exclusivamente a percepção de um único pecuarista, limitando a diversidade de perspectivas. Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a amostra de participantes, incorporando múltiplos perfis de tomadores de decisão para captar diferentes estratégias e prioridades. Também seria relevante testar o modelo em diferentes contextos agropecuários e regiões com distintas características climáticas e estruturais. Além disso, a aplicação do ICTP para outras problemáticas do processo de tomada de decisão. Outro ponto é a inclusão de novos critérios que podem fortalecer a abordagem diante dos desafios de sustentabilidade, tornando-a uma ferramenta mais estratégica em cenários complexos e incertos.

REFERÊNCIAS

- Agricultural Outlook – OECD FAO. (2024). Commodities Meat. Recuperado de <https://www.agrioutlook.org/commodities/meat.pdf>
- Antony Kevin, S., Arokiaprakash, A. (2024). Effectiveness of Multicriteria Decision-Making for Ongoing Construction Projects - AHP Method. In: Gencel, O., Balasubramanian, M., Palanisamy, T. (eds) Sustainable Innovations in Construction Management. ICC IDEA 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 388. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6233-4_57
- Blessy, S. S. (2024). Precision Agriculture Decision Support Using Machine Learning. Indian Scientific Journal of Research in Engineering and Management. DOI: 10.55041/ijjsrem29762
- Brazilian Beef Exporters Association - ABIEC. (2022). Beef Report 2022 - A pecuária do Brasil. <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2022/> (accessed 06 September 2024).
- Brazilian Beef Exporters Association - ABIEC. (2023). Beef Report 2023 - A pecuária do Brasil. Recuperado de <https://www.abiec.com.br/wp-content/uploads/Final-Beef-Report-2023-Completo-Versao-web.pdf/>
- Brough, P. (Ed.). (2024). Advanced Research Methods for Applied Psychology: Design, Analysis and Reporting (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003362715>
- Cardoso, R. R., Sousa, L. F., Holanda, A. C. F., & Bentes, G. N. (2022). Performance supplementation and ingestive behavior of sheep finished in continuous pasture in the period of water restriction. Acta Scientiarum. Animal Sciences, 44(1), e53855. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v44i1.53855>
- Cole, N. A., Clark, R. N., Todd, R. W., Richardson, C. R., Gueye, A., Greene, L. W., & McBride, K. (2005). Influence of dietary crude protein concentration and source on potential ammonia emissions from beef cattle manure. Journal of Animal Science, 83(3), 722-731.

- Cunha, A., & Morais, D. (2019). Problem structuring methods in group decision making: a comparative study of their application. *Operational Research*, 19, 1081-1100.
- Cruz, N. N., Sarmento, F. J., Tahimi, A., & Duarte, A. D. (2025). Implementation of The Balanced Decision-Making Method for Prioritizing Crop Planting in Small-Scale Rural Properties. *Pesquisa Operacional*, 45, e288556.
https://doi.org/10.1590/01017438.2025.045.002885_56
- Drumond, P., Basílio, M.P., Costa, I.P. de A., Pereira, D.A. de M., Gomes, C.F.S., dos Santos, M. (2021). Multi-criteria Analysis in Additive Manufacturing: An ELECTRE-MOr Based Approach. Presented at the October 29
- Duarte, A. D. (2024). Revisão sistemática do método TOPSIS e suas aplicações na agricultura. *Revista Produção Online*, 24(2), 5245-5245.
- Entani, T. (2023). Different Types of Decision Criteria in a Decision Problem. In: Huynh, VN., Le, B., Honda, K., Inuiguchi, M., Kohda, Y. (eds) Integrated Uncertainty in Knowledge Modelling and Decision Making. IUKM 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14375. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-46775-2_8
- Fiumaro, J. E. C., Brennecke, K., Zeferino, C. P., & Pereira, L. A. M. (2024). Considerações da legislação brasileira sobre exportação de proteína animal. Seven Editora, 142-157.
- Giacomel, A., Freitas, T. C. de., Costa, A. L. B. da., Sbardelotto, E. M., Bergmann, E., & Debortoli, E. de C. (2022). Mineral supplementation for beef cattle – a meta-analysis. *Research, Society and Development*, 11(3), e39211326616. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26616>
- Gheddar, R. (2023). Decision-making criteria under uncertainty and risk in the agricultural sector. *Journal of Innovations and Sustainability*, 7(4), 06-06.
- Gomes Junior, A. D. A. & Schramm, V. B. (2022). Problem structuring methods: a review of advances over the last decade. *Systemic Practice and Action Research*, 35(1), 55-88.
- Hamid, S. S., Santos, M. A. S. D., Aguiar, A. F., Andreatta, T., Costa, N. L., Lopes, M. L. B., & Lourenço-Júnior, J. D. B. (2023). Changes and Factors Determining the Efficiency of Cattle Farming in the State of Pará, Brazilian Amazon. *Sustainability*, 15(13), 10187.
- Henn, D., Duffy, C., Humphreys, J., Gibbons, J., Byrne, K. A., & Styles, D. (2024). Cattle production strategies to deliver protein with less land and lower environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 356, 120569.
- Hwang, C. L., Yoon, K., Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making.
- Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey, 58-191.
- Kearney, M., O'Riordan, E. G., Byrne, N., Breen, J., & Crosson, P. (2023). Mitigation of greenhouse gas emissions in pasture-based dairy-beef production systems. *Agricultural Systems*, 211, 103748.
- Krehbiel, C. (2022). 93 research needs to advance nutrient requirements for beef cattle. *Journal of Animal Science*, 100(Suppl 3), 43.
- Matos, C., Junkes, V. H., Lermen, F. H., Magalhães, R. F. D., Matias, G. D. S., Ribeiro, J. L. D., ... & Siqueira, H. V. (2024). Life cycle sustainability assessment of the agri-food chain: empirical review and bibliometrics. *Production*, 34, e20230043.
- Menendez III, H. M., Atzori, A., Brennan, J., & Tedeschi, L. O. (2023). Using dynamic modelling to enhance the assessment of the beef water footprint. *Animal*, 17, 100808.
- Mohammadi, A., Yousefi, H., & Mahmoudi Aznaveh, A. (2024). Evaluation of Tehran Province Livestock Production from Water Footprint Prospective. *Environmental Energy and Economic Research*, 8(2).
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). Nutrient Requirements of Beef Cattle: Eighth Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/19014>.
- Ngxumeshe, A. M., Ratsaka, M., Mtileni, B., & Nephawe, K. (2020). Sustainable application of livestock water footprints in different beef production systems of South Africa. *Sustainability*, 12(23), 9921.
- Noinan, K., Netpakdee, N., Temdee, P., Wicha, S., & Chaisricharoen, R. (2022, January). Decision Tree based Feeding Program Recommendation in Beef Cattle. In 2022 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT & NCON) (pp. 389-394). IEEE.
- Ohlsson, J., Han, S. (2018). The Prioritisation and Categorisation Method - PCM. In: Prioritising Business Processes. SpringerBriefs in Business Process Management. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-70398-5_3
- Palhares, J. C. P., Morelli, M., & Novelli, T. I. (2021). Water footprint of a tropical beef cattle production system: The impact of individual-animal and feed management. *Advances in Water Resources*, 149, 103853.
- Pereira, B. R. A. & de Carvalho, J. B. (2025). Análise econômica e viabilidade da pecuária de corte no Leste de Mato Grosso Do Sul. *Revista Ouricuri*, 15(1), 03-20.
- Permono, B. & Kurniati, A. (2024). Decision-Making Processes in Resource Management: Lessons from

- the Agriculture Sector. *Journal of Resource Management and Decision Engineering*, 3(2), 13-23.
- Raji, E., Ijomah, T. I., & Eyieyien, O. G. (2024). Data-Driven decision making in agriculture and business: The role of advanced analytics. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(7), 1565-1575.
- Rodrigues Junior, U. J., & Dziedzic, M. (2021). The water footprint of beef cattle in the amazon region, Brazil. *Ciência Rural*, 51, 20190294.
- Salgado, N. F., da Silva, P. A. L., da Silva Júnior, O. S., Portella, A. G., Moreira, M. Â. L., & dos Santos, M. (2023). Application of the PrOPPAGA Method in the evaluation of returnable stretches in the context of the processes of early extension of railway concessions. *Procedia Computer Science*, 221, 277-284.
- Santos, C. O., de Siqueira Pinto, A., Dos Santos, M. P., Alves, B. J. R., Neto, M. B. R., & Ferreira, L. G. (2024). Livestock intensification and environmental sustainability: An analysis based on pasture management scenarios in the brazilian savanna. *Journal of Environmental Management*, 355, 120473.
- Santos, F. B. & dos Santos, M. (2021). Prioridade observada a partir da presunção de atitude gaussiana das alternativas (PrOPPAGA): proposta axiomática e desenvolvimento de uma plataforma computacional para um novo método multicritério de apoio à tomada de decisão. *Revista SIMEP*, 1(1).
- Santos, F. B. & dos Santos, M. (2022). Choice of armored vehicles on wheels for the Brazilian Marine Corps using PrOPPAGA. *Procedia Computer Science*, 199, 301-308.
- Santos, F. B., dos Santos, M., & Pellanda, P. C. (2021). Development and implementation of a computational tool for the multi-criteria decision analysis method PrOPPAGA: case study of the sorting of hospital assistance ships of the brazilian navy to face the COVID-19 pandemic. *Brazilian Journal of Development*, 7(10), 97813-97830.
- Santos, F. B., Santos, M. (2022). www.proppaga.com.br, v. 2.
- Sarah, J., Marieke, G., Maria, W., J. A., van, Til., Dennis, W., Raisch., J.G., van, Manen., Maarten, Joost, I. (2014). 4. A Systematic Review to Identify the Use of Preference Elicitation Methods in Health Care Decision Making. *Value in Health*, DOI: 10.1016/J.JVAL.2014.08.1596
- Sawalhah, M. N., Geli, H. M., Holechek, J. L., Cibils, A. F., Spiegel, S., & Gifford, C. (2021). Water footprint of rangeland beef production in new mexico. *Water*, 13(14), 1950.
- Silva Sena, B., Souza, R. W. C., Prado, K. E. M., Neves, J. E. G., Bruziguessi, E. P., & Oliveira, I. A. A. (2024). Explorando alternativas alimentares sustentáveis: espécies nativas do cerrado na alimentação de bovinos a pasto. *Cadernos de Agroecologia*, 19(1).
- Silva Moraes, S. (2001). Importância da suplementação mineral para bovinos de corte. Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte.
- Simos, J. (1989). L'évaluation environnementale: Un processus cognitif négocié (No. 823). EPFL.
- Souza, D. S., Milhomem, G. S., dos Santos, M., & de Carvalho, J. P. (2023). Aplicação do método PrOPPAGA na cadeia de suprimentos. *Revista Eixo*, 12(3), 106-115.
- Spers, M. J. S., Marcondes, O. G., Spers, R. C., Gaion, L. A., Carratore, C. R. D., da Costa, I. B., da Silva, L. P., & Minardi, L. G. (2024). Development of an application prototype for nutritional supplements of beef cattle in the dry season aimed for rural producers. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22(2), e3501. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n2-233>
- Uyeh, D. D., Pamulapati, T., Mallipeddi, R., Park, T., Asem-Hiablie, S., Woo, S., ... & Ha, Y. (2019). Precision animal feed formulation: An evolutionary multi-objective approach. *Animal Feed Science and Technology*, 256, 114211.
- Von Winterfeldt, D. & Edwards, W. (1993). *Decision analysis and behavioral research*.
- Vilela, D., Matos, L. L. de D'Oliveira, P. S., Oliveira, J. S. e, Verneque, R. da S., & Martins, C. E. (2024). Índices de qualidade nutricional como critério de seleção no melhoramento de forrageiras. *Revista Contemporânea*, 4(10), e5939. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV4N10-002>
- Wang, T., Kreuter, U., Davis, C., & Cheye, S. (2024). Climate impacts of alternative beef production systems depend on the functional unit used: Weight or monetary value. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(31), e2321245121.
- Yang, T. & Chou, P. (2005). Solving a multiresponse simulation-optimization problem with discrete variables using a multiple-attribute decision-making method. *Mathematics and Computers in simulation*, 68(1), 9-21.
- Zhang, H., Zhuo, L., Xie, D., Liu, Y., Gao, J., Wang, W., ..., & Wu, P. (2022). Water footprints and efficiencies of ruminant animals and products in China over 2008–2017. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134624.