

AUMENTO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE OBRAS RODOVIÁRIAS POR MEIO DE UM MODELO MULTICRITÉRIO BASEADO EM LÓGICA FUZZY

G. H. N. SILVA, L. O. GEISENHOF, R. C. SANTOS*, A. V. A. MOTOMIYA, E. P. GOMES, R. A. JORDAN

Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)^{1, 2, 3, 4, 5, 6}

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4585-9305>³

rodrigocouto@ufgd.edu.br³

Submetido 27/07/2023 - Aceito 16/05/2025

DOI: 10.15628/holos.2025.15774

RESUMO

Devido à sua relevância a infraestrutura de transportes tem sido objeto de extensas pesquisas. No Brasil, o transporte rodoviário interliga toda a cadeia produtiva e incorre em custos substanciais. Assim, este estudo teve como objetivo propor um modelo multicritério baseado em lógica fuzzy para auxiliar na redução dos custos de construção de obras rodoviárias. As variáveis de entrada consideradas no modelo foram o número de o número de fatores que agregam custo à construção, a extensão do trecho a ser construído e os níveis de estresse térmico

ambiental sofridos pelos trabalhadores durante o trabalho. A variável de saída representou a viabilidade econômica do projeto rodoviário. Os resultados demonstraram a eficiência do modelo proposto na avaliação da viabilidade da construção de rodovias, contribuindo de forma interdisciplinar com os setores produtivo, econômico e social do Brasil. Cada variável envolvida no modelo desempenhou um papel relevante na composição geral do custo.

PALAVRAS-CHAVE: Economia aplicada, engenharia 4.0, simulação, sistema especialista.

ENHANCING ECONOMIC VIABILITY OF ROAD WORKS THROUGH A MULTICRITERIA MODEL BASED ON FUZZY LOGIC

ABSTRACT

Due to its significance, transport infrastructure has been the subject of extensive research. In Brazil, road transport interconnects the entire production chain and incurs substantial costs. Thus, this study aimed to propose a multicriteria model based on fuzzy logic to assist in reducing construction costs for road works. The input variables considered in the model were the number of factors that add cost to construction, length of the segment to be built, and levels of environmental thermal

stress suffered by workers during work. The output variable represented the economic viability of the road project. The results demonstrated the effectiveness of the proposed model in evaluating the viability of highway construction, contributing in an interdisciplinary way with Brazil's productive, economic, and social sectors. Each variable involved in the model played an important role in the overall cost composition.

KEYWORDS: Applied economics, engineering 4.0, simulation, expert system.

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário, segundo destacado por Oliveira e Araujo (2023), é o principal modo de transporte no Brasil, respondendo por mais de 58% do movimento de cargas do país. Embora a rede rodoviária brasileira tenha extensão de 1,72 milhão de quilômetros, ela enfrenta desafios significativos, com apenas 12,4% das estradas pavimentadas. Essa expansão insuficiente da rede rodoviária tem prejudicado a capacidade do país atender à demanda por estradas pavimentadas, resultando em discrepâncias em comparação a outras nações em desenvolvimento e dificultando o transporte eficiente de cargas e passageiros (Gao & Zhu, 2022).

A pavimentação e manutenção das estradas são impulsionadas pelas demandas das pessoas e veículos em movimento. Isso envolve diversos fatores, como custos, capacidade de produção, prazos e equipamentos, especialmente no setor público. Portanto, a eficácia das obras rodoviárias depende da seleção de materiais e equipamentos adequados, cumprimento de prazos e técnicos capacitados (Kassa, 2020).

Devido ao crescimento exponencial da população global, os investimentos em infraestrutura de transporte com o objetivo de melhorar sua eficiência e sustentabilidade têm sido objeto de estudos intensos. Pesquisas que se concentram no transporte rodoviário têm impacto positivo na produtividade, acessibilidade, fluxo de mercadorias e pessoas, e conectividade inter-regional (Acheampong, Opoku, Dzator & Kufuor, 2022).

Além dos investimentos em infraestrutura, considerações importantes incluem os custos de manutenção, conservação e restauração ao longo da vida útil das rodovias. Esses tendem a aumentar com o tempo devido à deterioração do pavimento. Portanto, é essencial manter a qualidade dos sistemas rodoviários desde sua implementação visando garantir uma infraestrutura duradoura e adequada (Palit, Bari & Karmaker, 2022).

A integração de tecnologias avançadas na construção de estradas pode aprimorar a qualidade e durabilidade dos projetos, resultando em redução dos custos de manutenção e futuros reparos. A construção de rodovias bem projetadas contribui para a melhoria da produção e logística, promovendo o desenvolvimento regional e nacional. Assim, pesquisas envolvendo o uso de modelagem computacional são importantes para garantir projetos de alta qualidade e eficiência econômica, o que justifica sua realização.

A transformação digital impulsionada pela integração de tecnologias 4.0, Internet das Coisas (IoT) e modelos de Inteligência Artificial (IA) teve um impacto significativo na melhoria da eficiência e qualidade de projetos, elevando os padrões globais a níveis nunca antes alcançados em termos de sustentabilidade construtiva (Santos et al., 2023). Nesse sentido, a adoção de tecnologias emergentes, como modelagem voltada para a construção de estradas, representa uma oportunidade promissora para otimizar processos, reduzir custos e promover o desenvolvimento regional sustentável.

Portanto, pesquisa envolvendo modelagem computacional é essencial para garantir projetos de alta qualidade e alcançar eficiência econômica pois permite simular e testar diferentes cenários

de construção antes da execução física, identificar problemas potenciais que possam surgir e facilitar sua resolução em tempo hábil, de maneira eficiente e com custos adequados (Patcharachavalit, Limsawasd & Athigakunagorn, 2023).

A aplicação de sistemas inteligentes no planejamento da construção de estradas pode resultar em significativa redução dos custos de construção, impactando diretamente no valor do frete para bens de consumo, estimulando o crescimento e progresso do mercado (Jahani, Sepehri, Vandchali & Tirkolaee, 2021).

Sistemas especialistas e conceitos básicos de transporte rodoviário desempenham um papel essencial nos avanços científicos e tecnológicos, contribuindo para a tomada de decisões estratégicas, otimizando recursos e reduzindo custos. Essas contribuições tornam o desenvolvimento regional mais acessível, ao mesmo tempo em que melhoram a eficiência da utilização de recursos financeiros. De acordo com Da Silva Júnior, Martins e Librantz (2021), a modelagem com lógica *fuzzy* é recomendada para aumentar a flexibilidade na compreensão de respostas, apoiando diversos aspectos de gerenciamento em estudos interdisciplinares.

O modelo proposto nesta pesquisa visou auxiliar estudos de viabilidade por meio de uma estrutura racional e processo sistemático para tomada de decisão multicritério. A estimativa conceitual de custo durante as etapas iniciais do projeto, é importante para tomada de decisões de viabilidade financeira, confecção de orçamentos e previsão de gastos reais.

Chen e Zheng (2021) enfatizaram o elevado nível de incerteza na construção de estradas, o que aumenta o risco de perdas e torna desafiador produzir orçamentos confiáveis. Afirmam ainda que custos excedentes podem surgir no escopo inicial, condições imprevistas, flutuações de mercado, entre outros fatores. O perfil de um projeto engloba múltiplos componentes, como custos de materiais, despesas com equipamentos, administração da equipe e gestão da construção, entre outros.

Neste contexto, este estudo avaliou variáveis relacionadas aos custos iniciais de orçamento para rodovias pavimentadas, com foco principal em seus aspectos estruturais. O objetivo foi desenvolver um sistema de modelagem inteligente baseado em lógica *fuzzy* que possa estimar com maior precisão a viabilidade da construção de rodovias com base nas características do projeto.

O principal objetivo foi construir um sistema especialista utilizando lógica *fuzzy* que envolva variáveis-chave associadas à construção de rodovias pavimentadas, aprimorando sua viabilidade econômica e auxiliando na tomada de decisões desses projetos. Os objetivos específicos incluíram identificar as principais variáveis que influenciam o custo de estradas pavimentadas, tornar a viabilidade econômica das obras rodoviárias mais precisa por meio da aplicação da lógica *fuzzy* e testar o sistema especialista com situações reais.

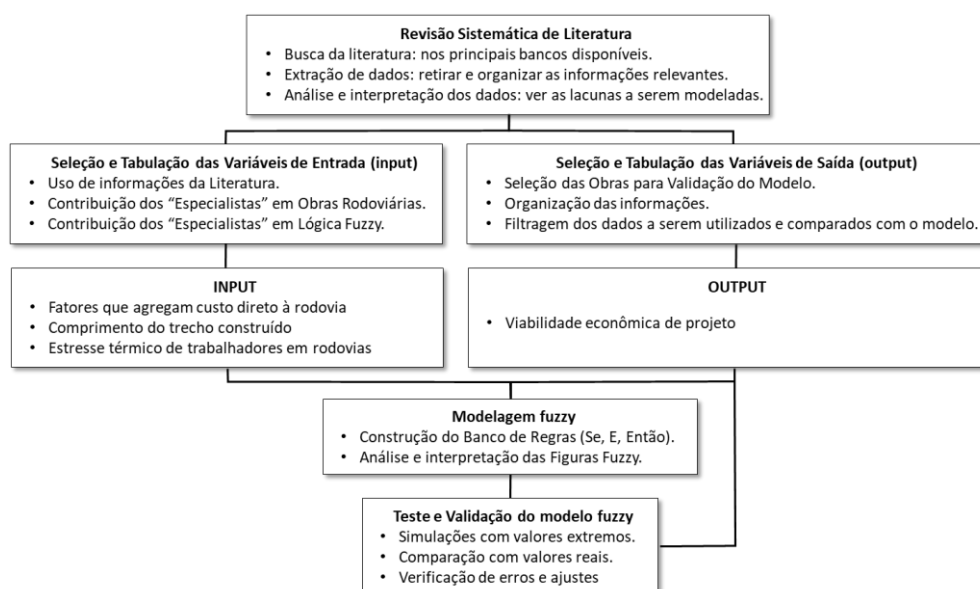
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Visão geral do experimento

A metodologia detalhada da investigação está apresentada na Figura 1 de forma a se visualizar de forma concisa a descrição da pesquisa.

Figura 1.

Fluxograma geral de execução da Pesquisa.



A pesquisa foi realizada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizado no município de Dourados – MS - Brasil, coordenadas, Lat 22°11'38.66"S, Long 54°55'53.26"O, Altitude média 464 metros, precipitação média anual de 1400mm e clima classificado como Cwa, mesotérmico úmido com verões quentes e invernos secos, conforme classificação de Köppen (Alvares, Stape, Sentelhas & Gonçalves, 2013; Cesca et al., 2021).

Esta etapa foi incluída pois, de acordo com Lovatto et al. (2020), que estudaram a programação como uma ferramenta de tomada de decisão construtiva, existe uma relação direta entre as informações disponíveis na literatura, observações no trabalho e a otimização do tempo e dos recursos envolvidos.

2.2 Revisão Sistemática de Literatura

Para construção do banco de dados foi realizada revisão sistemática da literatura nas plataformas *Google Scholar*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*, além de registros disponibilizados diretamente pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A busca foi realizada a partir de

2010 com base em palavras chave relacionadas ao objetivo da investigação, sendo as principais transporte rodoviário, infraestrutura de transporte, tomada de decisão, viabilidade econômica, modelagem, rodovias, custos de construção e lógica *fuzzy*.

Barreto e Amorim (2020) estudaram o desempenho técnico de diferentes misturas para uso em obras viárias e também utilizaram como referência normas ABNT e legislações dispostas pelo DNIT.

2.3 Seleção e Tabulação das Variáveis de entrada (Input)

Após a revisão bibliográfica, foram identificados os fatores que impactam diretamente no custo de uma rodovia e agrupados em três principais variáveis interativas. Essas variáveis incluíram os fatores que agregam custo direto na construção da rodovia, a complexidade relacionada ao comprimento do trecho e os níveis de estresse térmico ambiental experimentados pelos trabalhadores durante a construção.

2.3.1 Fatores que agregam custo direto à rodovia

Lanzaro e Andrade (2023) propuseram um método de modelagem utilizando lógica *fuzzy* para auxiliar na construção de projetos geométricos de estradas para países em desenvolvimento. O método considera fatores como topografia, classe da estrada, largura, comprimento, velocidade de condução, materiais e serviços envolvidos a fim de se obter um projeto mais econômico.

Dadas as inúmeras variáveis que influenciam o custo final de uma rodovia, esta investigação analisou as variáveis identificadas na literatura com a contribuição de especialistas que atuam na construção de rodovias. Sua experiência ajudou a identificar os parâmetros mais significativos para a previsão de custos.

Para compor a “entrada” relacionada ao número de Quesitos-Atendidos durante a construção da estrada, uma função de pertinência foi desenvolvida. Essa função atribuiu notas de 0 a 10 às variáveis incluídas no projeto, utilizando os conceitos de ruim, regular e bom. A Tabela 1 apresenta a função de pertinência para as Questões-Atendidas, juntamente com as respectivas faixas de valores.

Tabela 1.

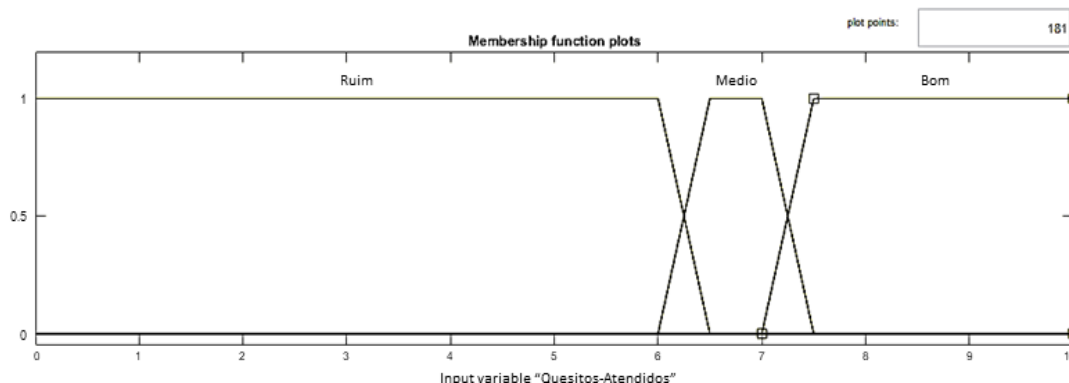
Funções de Pertinência para Quesitos-Atendidos.

Intervalo	Função de Pertinência	Curva
Bom	[7 7,5 10 10]	Trapezoidal
Médio	[6 6,5 7 7,5]	Trapezoidal
Ruim	[0 0 6 6,5]	Trapezoidal

No simulador *fuzzy* do Matlab® (MATLAB, 2017) esta variável de entrada com suas funções de pertinências está representada como na Figura 2.

Figura 2.

Variável de entrada Quesitos-Atendidos.



2.3.2 Comprimento do trecho construído

A extensão do trecho é um parâmetro crucial no projeto viário, pois influencia diretamente no custo por quilômetro de construção. A topografia do terreno, seja plano, ondulado ou montanhoso, tem impacto direto no orçamento geral. Além disso, a velocidade diretriz é determinada para cada empreendimento e sua classe, tem juntas tem papel significativo no estabelecimento das condições técnicas necessárias para garantir a trafegabilidade, segurança e resultado final esperado.

Neste modelo, a variável de entrada considerada foi uma combinação de Classe da rodovia em função da Velocidade Diretriz, para terrenos planos, ondulados e montanhosos. Além disso, distâncias mínimas e ideais foram consideradas para facilitar a ultrapassagem segura do veículo com base na Velocidade de Projeto descrita pelo DNIT (DNIT, 2010). Usando essas informações, os intervalos linguísticos para a função de pertinência "Comprimento-Trecho" foram definidos conforme a Tabela 2.

Tabela 2.

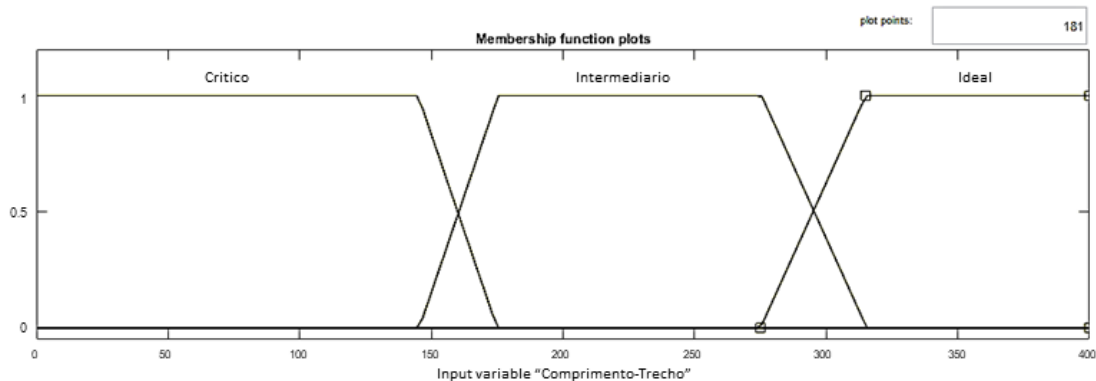
Funções de Pertinência para Comprimento-Trecho.

Intervalo	Função de Pertinência	Curva
Critico	[0 0 145 175]	Trapezoidal
Intermediário	[145 175 275 315]	Trapezoidal
Ideal	[275 315 400 400]	Trapezoidal

A Figura 3 mostra a variável de entrada, junto com suas funções de pertinência correspondentes, usando o simulador fuzzy do Matlab®.

Figura 3.

Variável de entrada Comprimento-Trecho.



2.3.3 Estresse térmico de trabalhadores em rodovias

Segundo Cesca et al. (2021), as variações de temperatura em ambientes com exposição térmica estão intimamente ligadas à umidade relativa. Assim, determinou-se que o Índice de Desconforto Humano (IDH) serviria como variável de entrada para avaliar os níveis de estresse por calor e frio vivenciados pelos trabalhadores. Este índice incorpora tanto a temperatura quanto a umidade relativa, permitindo uma avaliação abrangente das condições de conforto térmico.

A função de pertinência associada ao IDH e suas correspondentes condições de conforto térmico estão descritas na Tabela 3.

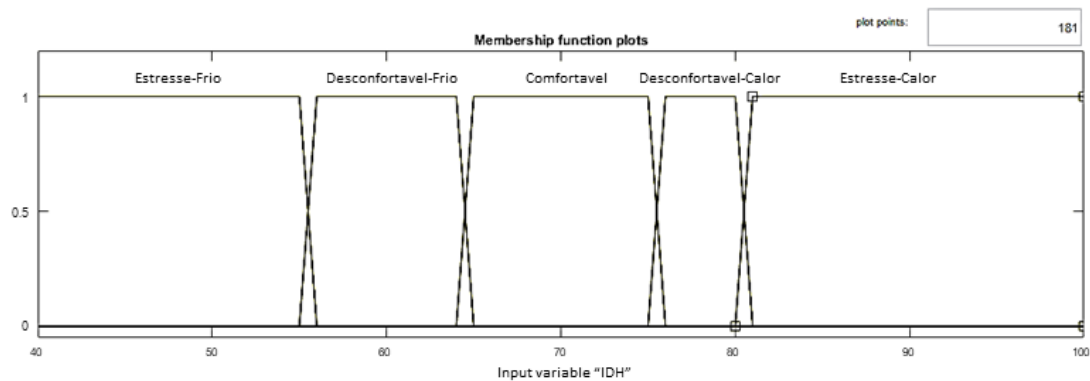
Tabela 3.

Funções de Pertinência para o IDH.

Intervalo de IDH	Função de Pertinência	Efeito
IDH > 80	[79 81 100 100]	Estresse-Calor
75 > IDH > 80	[74 76 79 81]	Desconfortável-Calor
60 > IDH > 75	[59 61 74 76]	Confortável
55 > IDH > 60	[54 56 59 61]	Desconfortável-Frio
IDH < 55	[40 40 54 56]	Estresse-Frio

Nota. Gomes, Silva e Silva (2019), adaptado.

A variável de estresse térmico foi representada usando uma função de pertinência trapezoidal no simulador *fuzzy* do Matlab®. A Figura 4 representa essa variável, mostrando os termos linguísticos e suas respectivas funções de pertinência.

Figura 4.*Variável de entrada IDH.*

2.4 Seleção e Tabulação da Variável de saída (Output)

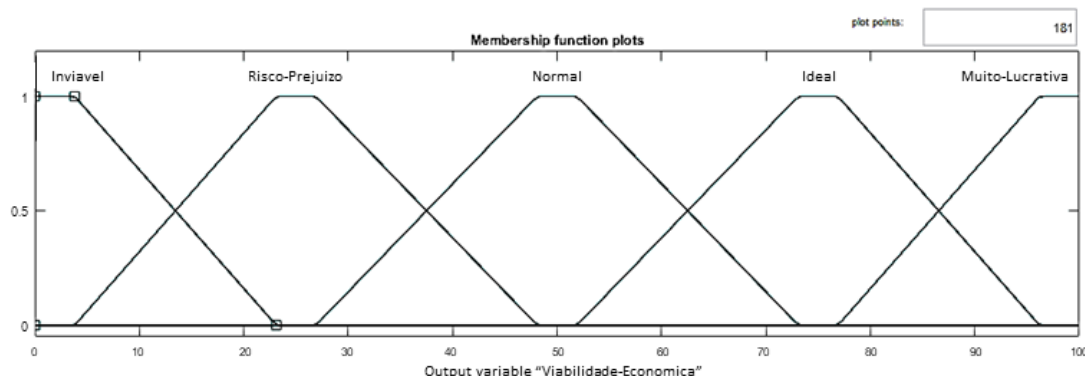
A variável de saída (output), “Viabilidade-Econômica”, foi construída com base nas informações fornecidas por especialistas do DNIT, que forneceram dados de 20 projetos para avaliação do modelo. Essa variável permitiu que os usuários avaliassem o impacto das variáveis de entrada combinadas no potencial lucro ou prejuízo de projetos de obras rodoviárias.

Para estabelecer a faixa de "Viabilidade-Econômica", foi fixado um domínio de [0,100]. Essa faixa foi dividida em intervalos com igual distribuição (Tabela 4). Segundo Bektaş e Kegyes-Brassai (2023), a saída de um sistema *fuzzy* pode ser representada em uma escala de 0 a 100, com funções igualmente distribuídas, melhorando assim a precisão na representação do resultado do sistema.

Tabela 4.*Funções de Pertinência para Viabilidade-Econômica.*

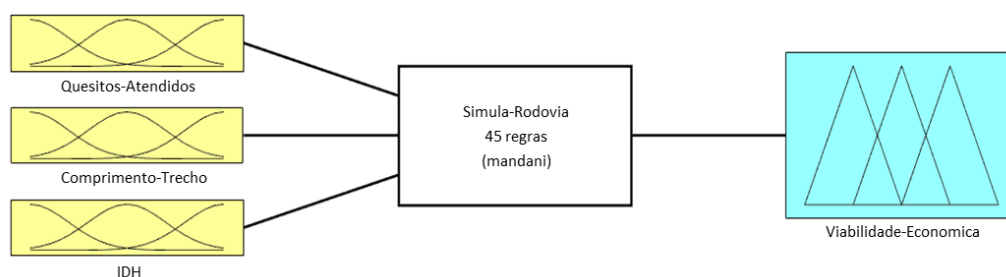
Intervalo	Função de Pertinência	Curva
Muito-Lucrativa	[76.9 96.2 100 100]	Trapezoidal
Ideal	[51.9 73.1 76.9 96.2]	Trapezoidal
Normal	[26.9 48.1 51.9 73.1]	Trapezoidal
Risco-Prejuízo	[3.8 23.1 26.9 48.1]	Trapezoidal
Inviável	[0 0 3.8 23.1]	Trapezoidal

A Figura 5 ilustra a variável de saída e suas correspondentes funções de pertinência, usando o simulador *fuzzy* do Matlab®.

Figura 5.*Variável de saída Viabilidade-Econômica.*

2.5 Regras de Inferência do Sistema

O modelo *fuzzy* foi desenvolvido no software MATLAB R2017a® (MATLAB, 2017). O programa facilitou a configuração de regras, visualização e simulação de vários cenários de algoritmos, bem como funções de processamento e ativação de dados. A Figura 6 ilustra a tela inicial exibindo a estrutura do simulador construído.

Figura 6.*Configuração básica do fuzzy logic toolbox.*

Nota. MATLAB R2017a®.

Neste estudo, o método de inferência Mamdani foi empregado para combinar valores de entrada usando operadores mínimos e máximos, resultando em um sistema especialista. O banco de regras *fuzzy* foi composto por 45 sentenças e foi gerado com base na literatura, incorporando as preposições SE, E e ENTÃO. As regras foram ponderadas de acordo com o conhecimento e experiência dos especialistas na área.

Para a etapa de *defuzzificação* foi utilizado o método do "Centro de Gravidade". Este método considerou todos os valores de saída possíveis e transformou o modelo *fuzzy* em um conjunto numérico (Zhang, Li, Liu & Zhang, 2021).

2.6 Teste e Validação do Modelo

O modelo *fuzzy* desenvolvido foi avaliado e validado seguindo a abordagem proposta por Olowosulu, Kaura, Murana e Adeke (2022). Esses autores recomendaram comparar simulações com observações de campo para garantir a precisão e confiabilidade do modelo. Para validação, foram utilizados dados fornecidos pelo DNIT, incluindo tempo de execução, tamanho da obra, distâncias dos materiais (como areia, cimento e aço), volumes de escavação e aterro, Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), Obras de Artes Especiais (OAE), cobertura do terreno e mensurações de estresse térmico usando IDH. Esses dados foram analisados e discutidos com especialistas para verificar a precisão e eficácia do modelo.

A avaliação da qualidade do sistema *fuzzy* seguiu a abordagem proposta por Patel, Patel, Patel e Shah (2022). O Erro Médio Absoluto (EMA) e o Coeficiente de Correlação (CC) foram calculados usando o *software* MATLAB R2017a® (MATLAB, 2017). O EMA mediu o desvio médio entre as previsões do modelo e os dados reais, enquanto o CC avaliou a relação linear entre os valores previstos e observados.

Conforme proposto por Reges, Silva, Bezerra e Alexandria (2017), foram realizadas simulações, treinamento do modelo e testes para gerar resultados e identificar áreas de melhoria. Este processo iterativo visou refinar o simulador inteligente para se assemelhar a cenários do mundo real.

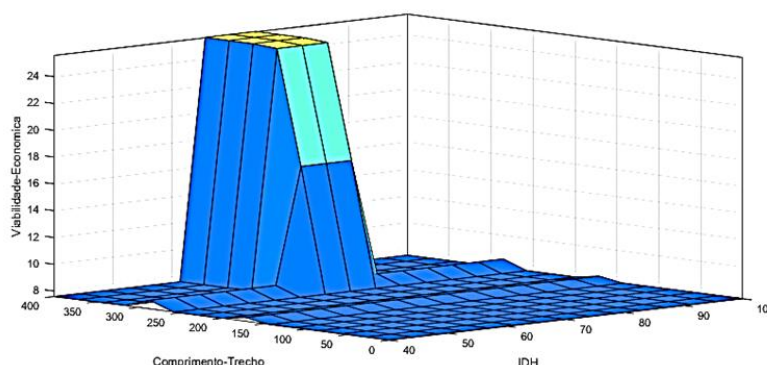
Os resultados obtidos possibilitaram a aplicação de conceitos interdisciplinares, integrando engenharia, ciência da computação, gestão ambiental, economia aplicada e sustentabilidade. Essas descobertas posteriormente facilitaram discussões aprofundadas sobre o cenário atual e propuseram soluções para reduzir custos em construção de estradas, aumentando assim sua viabilidade econômica. O objetivo final foi contribuir com o setor produtivo e logística de transportes no Brasil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta investigação resultou em modelos probabilísticos para avaliar a viabilidade econômica da implantação de rodovias. Esses modelos, baseados em lógica *fuzzy* e método multicritério, contribuem para uma melhor gestão de recursos.

3.1 Modelagem Multicritério baseado em lógica *fuzzy*

A Figura 7 ilustra graficamente a relação entre as variáveis de entrada, Comprimento-Trecho e IDH, tendo como função de saída a Viabilidade Econômica, dentro do modelo *fuzzy* proposto nesta pesquisa.

Figura 7.*Representação da Viabilidade Econômica em função do Comprimento-Trecho e IDH*

A Figura 7 demonstra o papel significativo do IDH na avaliação do conforto humano em diferentes condições ambientais. Um IDH acima de 80 indica alto estresse por calor, enquanto um IDH abaixo de 55 indica estresse por frio (Moghbel, 2020). Essas conclusões se alinham com as funções de pertinência apresentadas no modelo.

Quanto ao Comprimento-Trecho, estudos como o de Broniewicz e Ogrodnik (2020) têm destacado a teoria dos conjuntos *fuzzy* como uma ferramenta valiosa para análise multicritério. Os autores recomendam avaliar cuidadosamente as diferentes seções de um projeto, pois mesmo espaços menores podem compor paisagens complexas e influenciar significativamente sua viabilidade.

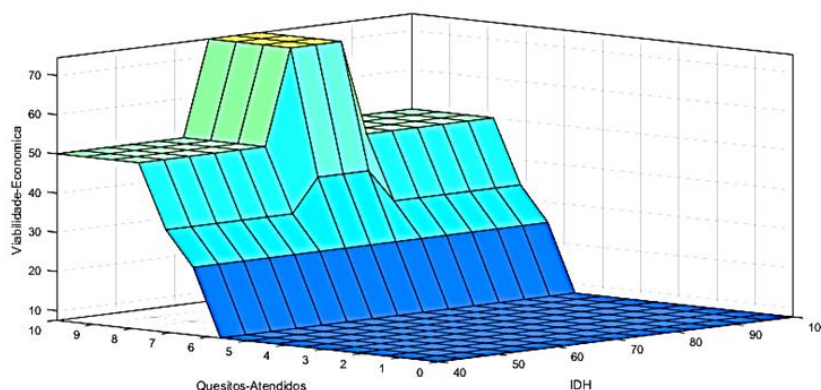
Na Figura 7, fica evidente que trechos com comprimento crítico estão sujeitos a problemas de segurança e aumento de custos operacionais, enquanto comprimentos intermediários requerem uma análise mais aprofundada em conjunto com outras variáveis. Quando o Comprimento-Trecho está entre 0 e 250 metros, independentemente do valor do IDH, a Viabilidade é considerada inviável e recebe o valor 8. Fatores como capacidade de infraestrutura existente, acessibilidade e complexidade do terreno desempenham um papel significativo nesse resultado (Zhao, Sun & Webster, 2022).

A interação entre IDH, Comprimento-Trecho e Viabilidade-Econômica é complexa e específica do projeto. Uma avaliação abrangente da viabilidade de obras rodoviárias requer uma abordagem integrada e multidisciplinar, considerando aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos (Harbiankova & Gertsberg, 2022).

A Figura 8 ilustra a relação entre as variáveis de entrada (input) Quesitos-Atendidos e IDH, tendo a Viabilidade-Econômica como função de saída (output) no modelo *fuzzy* proposto para esta pesquisa.

Figura 8.

Representação da Viabilidade-Econômica em função dos Quesitos-Atendidos e IDH



Os resultados da Figura 8 para simulação *fuzzy* revelam relações complexas entre Quesitos-Atendidos, Índice de Desconforto Humano (IDH) e a Viabilidade-Econômica resultante da rodovia. Inicialmente, observa-se que o IDH isolado não impacta significativamente a Viabilidade quando até 5,5 Quesitos são atendidos. Porém, se cerca de 8 Quesitos forem satisfeitos, o IDH passa a ter alto impacto na Viabilidade, pois se estiver na região de conforto, retorna a classificação ideal, enquanto nas regiões de estresse por calor ou frio, ainda assim promove Viabilidade normal.

O resultado destacado na Figura 8 indica uma Viabilidade-Econômica próxima ao valor máximo de 75% (ideal) quando o IDH corresponde a um nível de conforto e aproximadamente 78% dos Quesitos-Atendidos. Isso demonstra que ambos os fatores são importantes para alcançar a Viabilidade ideal. Wang et al. (2019) corroboram com esse resultado, enfatizando a importância de considerar o ambiente térmico no planejamento e viabilidade de projetos rodoviários.

Quando o IDH está em um nível de conforto térmico, mas somente até 5,5 Quesitos são atendidos, a Viabilidade é drasticamente reduzida para aproximadamente 9%. Isso reforça a importância de se atender um número adequado de Quesitos em projetos rodoviários para garantir a viabilidade, mesmo em condições favoráveis de conforto térmico. Kalra e Al-Qassem (2023) apoiam esta afirmação, enfatizando a necessidade de considerar variáveis adequadas no dimensionamento dos trechos rodoviários para garantir sua Viabilidade.

Ainda reforçam este estudo, Lima, Amorim, Oliveira e Moura (2021) quando compartilharam preocupações com a sustentabilidade referentes ao uso do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) visto que este material é único e essencial em obras rodoviárias, possui alto custo e impacta o ambiente durante todo o processo.

No entanto, conforme a Figura 8, quando o IDH está fora da zona de conforto térmico, mesmo com os Quesitos no valor ideal, a Viabilidade é reduzida a 50%. Isso indica que a Viabilidade-Econômica dos empreendimentos rodoviários pode ser comprometida se o conforto térmico dos trabalhadores não for levado em consideração. Nesse contexto, estudos têm enfatizado a importância de considerar as condições de exposição térmica dos trabalhadores em projetos

rodoviários para reduzir o impacto de afastamentos e doenças causadas por climas adversos (Karthick, Kermanshachi, Pamidimukkala & Namian, 2023).

3.2 Teste e Validação do Simulador de Viabilidade

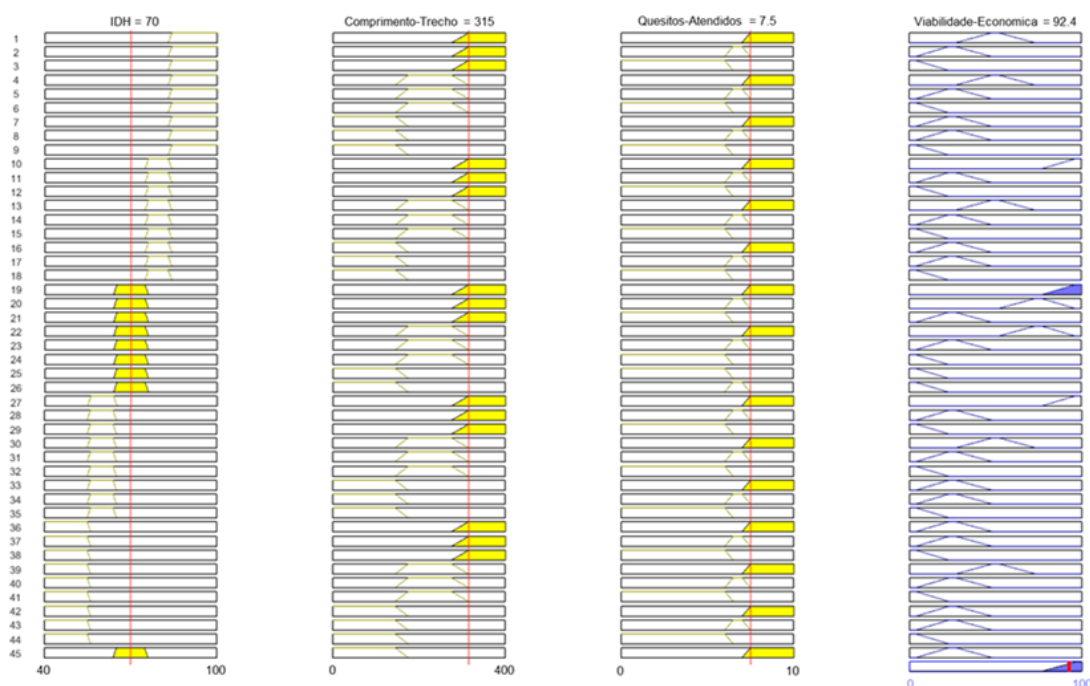
O modelo *fuzzy* construído foi validado por meio de simulações com informações da literatura e situações reais, verificadas por especialistas. A análise da variável de saída da rodovia, "Viabilidade-Econômica", foi realizada avaliando diferentes configurações das variáveis de entrada, destacando tanto as posições ideais quanto as extremas.

Para validar o modelo, foi seguido o protocolo proposto pelos especialistas em modelagem *fuzzy* Agrawal, Bansal, Kumar e Sisodia (2022) e Wang, Chen, Jin e Zhang (2022), que recomendaram a combinação de valores ótimos e extremos, em simulações com sistemas inteligentes visando sua validação, após superadas possíveis limitações apresentadas pelo modelo.

A Figura 9 ilustra a base de regras ativada do modelo *fuzzy*, considerando as três variáveis de entrada (Input): IDH, Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos, em seus melhores intervalos. Neste caso, o modelo *fuzzy* retornou uma Viabilidade-Econômica de projeto (Output) de 92,4%, classificada como "Muito Lucrativa". Este resultado demonstra a consistência do simulador.

Figura 9.

Base de Regas ativadas do modelo fuzzy considerando todas Inputs e Output ideais



Elmousalami (2020) estudou práticas e procedimentos de modelagem com IA para identificar a melhor forma de prever custos de construção de rodovias com base em dados de literatura. Os resultados das 20 técnicas de IA testadas mostraram que o método mais preciso e adequado proporcionou erro percentual médio absoluto de 9,091% e precisão de 92,9%. Esses resultados demonstram a alta precisão do simulador, conforme ilustrado na Figura 9, podendo, portanto, ser recomendados para estimar a viabilidade de rodovias envolvendo as mesmas variáveis utilizadas no modelo.

A análise de viabilidade econômica em projetos de infraestrutura e construção de estradas é um processo complexo que envolve múltiplos fatores (Khanani, Adugbila, Martinez & Pfeffer, 2021). Níveis inadequados ou oscilações em qualquer uma das variáveis envolvidas durante a execução do projeto pode comprometer o orçamento. Feng e Zhang (2022) investigaram o retorno financeiro dos investimentos em rodovias e afirmam que se o indicador de viabilidade do projeto estiver acima de 90%, a probabilidade de sucesso do empreendimento é alta.

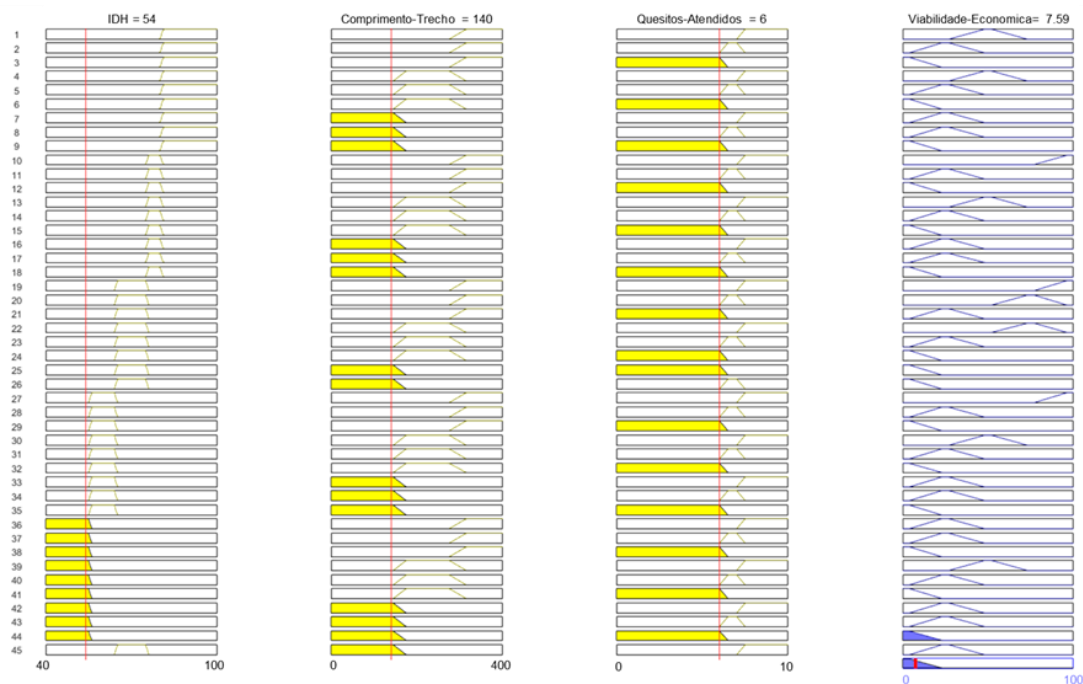
Em simulações onde duas variáveis de entrada foram mantidas dentro da faixa ideal enquanto uma foi ajustada para um valor inadequado, a Viabilidade-Econômica também alterou, seguindo o comportamento do modelo. Ajustar Comprimento-Trecho, Quesitos-Atendidos ou IDH para valores inadequados levou a uma Viabilidade-Econômica até 25,6%, indicando risco-prejuízo. Štilić e Puška (2023) endossam essas descobertas em sua discussão sobre a aplicação de técnicas de análise multicritério, como a lógica difusa, para lidar com a incerteza e subjetividade em fatores associados a projetos de construção. Os autores afirmam que variáveis complexas, como a distância do local a ser construído e exposição ambiental dos trabalhadores se relacionam.

A importância dos Quesitos na determinação da Viabilidade-Econômica é confirmada por Costa, Cruz, Sarmento e Sousa (2023), que destacam a influência de cada fator na composição dos custos das obras rodoviárias em nível de projeto. Os autores enfatizaram a necessidade de considerar as características específicas de cada construção e identificar as variáveis que mais influenciam os custos, reconhecendo também a importância individual de cada uma.

A Figura 10 apresenta a base de regras ativada do modelo *fuzzy* quando as três variáveis de entrada (IDH, Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos) estão em posições opostas às ideais. Neste cenário, o modelo *fuzzy* prevê uma Viabilidade-Econômica do projeto de 7,89%, classificada como “Inviável”, alinhando-se novamente com as observações do mundo real.

Figura 10.

Base de Regras ativadas do modelo fuzzy considerando todas Inputs insatisfatórias



Os resultados apresentados na Figura 10 indicam que quando o IDH é alto, o Comprimento-Trecho é crítico e apenas 6 (seis) Quesitos são atendidos, a Viabilidade-Econômica do projeto é Inviável. Essas informações têm grande importância para a tomada de decisão, pois evidenciam a interação de variáveis que, se mal gerenciadas, podem comprometer o sucesso do empreendimento (Prado Lima, Mendonça, Vergilio & Assunção, 2022).

Quando se trata de sistemas especialistas para estimativa de custos e orçamento, Patcharachavalit et al. (2023) afirmaram que vantagens como redução de tempo, maior precisão e menor investimento são evidentes. Segundo esses autores, sistemas especialistas também contribuem para uma melhor gestão de projetos, apoiando a tomada de decisão e promovendo a sustentabilidade.

Alvand, Mirhosseini, Ehsanifar, Zeighami e Mohammadi (2023) e Rezaee Arjroody, Hosseini, Akhbari, Safa e Asadpour (2023) recomendaram considerar o maior número possível de variáveis durante a fase de planejamento de um projeto rodoviário, pois a exclusão de qualquer variável pode ter um impacto negativo na viabilidade do projeto. Neste contexto, a avaliação do risco econômico associado a estas variáveis torna-se parte integrante do processo orçamentário e diversos métodos têm sido desenvolvidos para avaliar a complexidade de projeto, com especial destaque para os que utilizam a lógica *fuzzy*.

Considerando as simulações fuzzy que abrangeram as três variáveis de entrada – Índice de Desconforto Humano (IDH), Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos – em vários cenários com valores ótimos e extremos, os resultados obtidos alinham-se consistentemente com a variável de saída Viabilidade Econômica. A consistência e coerência entre os resultados simulados e os objetivos

do modelo, é possível afirmar que este foi submetido a rigorosos testes e validação, estabelecendo sua confiabilidade como ferramenta interdisciplinar de apoio à tomada de decisões para profissionais que necessitem avaliar projetos rodoviários. Além disso, estradas bem projetadas podem contribuir significativamente para a logística do agronegócio no Brasil.

4 CONCLUSÕES

O modelo de simulação proposto demonstrou sua eficácia na avaliação da viabilidade econômica de projetos para construção rodoviária. A inclusão do simulador *fuzzy* melhorou significativamente a precisão e eficiência da tomada de decisão para estimativa de custos antes da construção da rodovia.

Cada variável envolvida no processo orçamentário possui extrema relevância na composição final dos custos e não deve ser subestimada pelo projetista.

O uso da lógica *fuzzy* nesta pesquisa representa um avanço interdisciplinar significativo em direção à tomada de decisões sustentáveis no planejamento e construção de rodovias. Esse avanço tem um impacto positivo nos setores produtivo, econômico e social do Brasil.

A natureza interdisciplinar do modelo, com base no conhecimento da economia aplicada, engenharia 4.0 e sistemas especializados, contribui para a sustentabilidade a longo do tempo dos setores rodoviário e logístico. Representa uma valiosa fusão de conhecimentos que promove uma visão holística e precisa da viabilidade econômica de projetos rodoviários.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados (PGEA/UFGD) e ao Grupo de Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Edital PDPG 2022) pelo apoio financeiro fornecido para a realização deste estudo.

5 REFERÊNCIAS

- Acheampong, A. O., Opoku, E. E. O., Dzator, J., & Kufuor, N. K. (2022). Enhancing human development in developing regions: Do ICT and transport infrastructure matter? *Technological Forecasting and Social Change*, 180, 121725. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121725>
- Agrawal, H. P., Bansal, H. O., Kumar, R., & Sisodia, Y. S. (2022). Design and real-time validation of PI and Fuzzy Logic tuned photovoltaic integrated DSTATCOM to improve power quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(60), 90158–90177. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21910-7>
- Alvand, A., Mirhosseini, S. M., Ehsanifar, M., Zeighami, E., & Mohammadi, A. (2023). Identification and assessment of risk in construction projects using the integrated FMEA-SWARA-WASPAS model under fuzzy environment: A case study of a construction project in Iran. *International*

Journal of Construction Management, 23(3), 392–404.
<https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1877875>

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., & de Moraes Gonçalves, J. L. (2013). Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3), 407–427. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- Barreto, A. C., & Amorim, E. F. (2020). Avaliação do desempenho técnico de diferentes misturas de solo com resíduos de construção (RCD) para uso em obras viárias. *HOLOS*, 7, 1–20. <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9696>
- Bektaş, N., & Kegyes-Brassai, O. (2023). Development in Fuzzy Logic-Based Rapid Visual Screening Method for Seismic Vulnerability Assessment of Buildings. *Geosciences*, 13(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.3390/geosciences13010006>
- Broniewicz, E., & Ogrodnik, K. (2020). Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102351. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102351>
- Cesca, R. S., Santos, R. C., Goes, R. H. de T. e B. de, Favarim, A. P. C., Oliveira, M. S. G. de, & Silva, N. C. da. (2021). Thermal comfort of beef cattle in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 45, e008321. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145008321>
- Chen, W., & Zheng, M. (2021). Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 130, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103840>
- Costa, Á., Cruz, C. O., Sarmento, J. M., & Sousa, V. F. (2023). Bundling Road and Railway Infrastructure Operators: Analysis of the Impact on Efficiency. *Journal of Infrastructure Systems*, 29(1), 04023001. <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2106>
- DNIT. (2010). *Manual de Implantação Básica de Rodovia*. 3. Ed. - Rio de Janeiro, (IPR. Publ. 742), 617p. IPR. Publ.
- Elmousalami, H. H. (2020). Artificial Intelligence and Parametric Construction Cost Estimate Modeling: State-of-the-Art Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1), 03119008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001678)
- Feng, H., & Zhang, Y. (2022). Research on the Multi-attribute Evaluation Model for the Investment Results of County-level Highways in New Urbanization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(12), 4893–4911. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1687-8>
- Gao, Y., & Zhu, J. (2022). Characteristics, Impacts and Trends of Urban Transportation. *Encyclopedia*, 2(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020078>
- Gomes, C., Silva, M. L., & Silva, A. C. da. (2019). Monitoramento da qualidade do ar e conforto ambiental urbano da avenida treze de maio em Fortaleza, Ceará / Air quality monitoring and

- urban environmental comfort from may thirteen avenue in Fortaleza, Ceará. *Brazilian Journal of Development*, 5(10), Artigo 10. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n10-373>
- Harbiankova, A., & Gertsberg, L. (2022). Information Model for Sustainable Rural Development. *Energies*, 15(11), Artigo 11. <https://doi.org/10.3390/en15114009>
- Jahani, N., Sepehri, A., Vandchali, H. R., & Tirkolaee, E. B. (2021). Application of Industry 4.0 in the Procurement Processes of Supply Chains: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13(14), Artigo 14. <https://doi.org/10.3390/su13147520>
- Kalra, D., & Al-Qassem, A. (2023). Assessing the environmental and economic feasibility of using recycled materials in urban cities projects for sustainable development. *Journal of Namibian Studies : History Politics Culture*, 33, 1772–1787. <https://doi.org/10.59670/jns.v33i.815>
- Karthick, S., Kermanshachi, S., Pamidimukkala, A., & Namian, M. (2023). A review of construction workforce health challenges and strategies in extreme weather conditions. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 29(2), 773–784. <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2082138>
- Kassa, Y. F. (2020). *Determinants of Infrastructure Project Delays and Cost Escalations: The Cases of Federal Road and Railway Construction Projects in Ethiopia*. 63(1).
- Khanani, R. S., Adugbila, E. J., Martinez, J. A., & Pfeffer, K. (2021). The Impact of Road Infrastructure Development Projects on Local Communities in Peri-Urban Areas: The Case of Kisumu, Kenya and Accra, Ghana. *International Journal of Community Well-Being*, 4(1), 33–53. <https://doi.org/10.1007/s42413-020-00077-4>
- Lanzaro, G., & Andrade, M. (2023). A fuzzy expert system for setting Brazilian highway speed limits. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(2), 505–524. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.05.003>
- Lima, C. E. de, Amorim, E. F., Oliveira, H. da S., & Moura, L. F. de. (2021). Concreto asfáltico a quente dosado com resíduos de construção e demolição (RCD) aplicado em pavimento flexível. *HOLOS*, 1, 1–18. <https://doi.org/10.15628/holos.2021.9576>
- Lovatto, J., Santos, R. C., Souza, C. M. A. de, Zucca, R., Lovatto, F., & Geisenhoff, L. O. (2020). Use of linear programming for decision making: An analysis of cost, time and comfort of rural housing dwellings. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 622–629. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p622-629>
- MATLAB. (2017). *MATLAB [Computer software]. Version 9.2 R2017a*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2017 (9.2) [Win]. The MathWorks Inc.
- Moghbel, M. (2020). Evaluation of the human thermal discomfort index in different phases of North-Caspian Sea Patterns (NCP) in southern coasts of Caspian Sea, Iran. *Climate Change Research*, 1(4), 1–9. <https://doi.org/10.30488/ccr.2020.236996.1007>

- Oliveira, A. L., & Araujo, R. da C. de. (2023). Estabilização do solo com adição de cimento para fins de pavimentação em vias de baixo volume de tráfego. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 15(1), Artigo 1. <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/21120>
- Olowosulu, A. T., Kaura, J. M., Murana, A. A., & Adeke, P. T. (2022). Development of framework for performance prediction of flexible road pavement in Nigeria using Fuzzy logic theory. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(11), 3809–3818. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1922907>
- Palit, T., Bari, A. B. M. M., & Karmaker, C. L. (2022). An integrated Principal Component Analysis and Interpretive Structural Modeling approach for electric vehicle adoption decisions in sustainable transportation systems. *Decision Analytics Journal*, 4, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100119>
- Patcharachavalit, N., Limsawasd, C., & Athigakunagorn, N. (2023). Multiobjective Optimization for Improving Sustainable Equipment Options in Road Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(1), 04022160. <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-12544>
- Patel, D., Patel, S., Patel, P., & Shah, M. (2022). Solar radiation and solar energy estimation using ANN and Fuzzy logic concept: A comprehensive and systematic study. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32428–32442. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19185-z>
- Prado Lima, J. A., Mendonça, W. D. F., Vergilio, S. R., & Assunção, W. K. G. (2022). Cost-effective learning-based strategies for test case prioritization in continuous integration of highly-configurable software. *Empirical Software Engineering*, 27(6), 133. <https://doi.org/10.1007/s10664-021-10093-3>
- Reges, J. P., Silva, J. L. N. da, Bezerra, L. C. da S., & Alexandria, A. R. de. (2017). CONTROLE FUZZY DE ROBÔ DIFERENCIAL. *HOLOS*, 7, 98–109. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.3089>
- Rezaee Arjroody, A., Hosseini, S. azim, Akhbari, M., Safa, E., & Asadpour, J. (2023). Accurate estimation of cost and time utilizing risk analysis and simulation (case study: Road construction projects in Iran). *International Journal of Construction Management*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2210476>
- Santos, R. C., Lopes, A. L. N., Sanches, A. C., Gomes, E. P., Silva, E. A. S. da, & Silva, J. L. B. da. (2023). Intelligent automated monitoring integrated with animal production facilities. *Engenharia Agrícola*, 43, e20220225. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43n2e20220225/2023>
- Štilić, A., & Puška, A. (2023). Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices. *Eng*, 4(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.3390/eng4020088>
- Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Dimitriu, D., Clarke, G., & Bowden, D. (2019). How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? By creating a climate

adaptation framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 403–424. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.007>

Wang, X., Chen, Y., Jin, J., & Zhang, B. (2022). Fuzzy-clustering and fuzzy network based interpretable fuzzy model for prediction. *Scientific Reports*, 12(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20015-y>

Zhang, W., Li, B., Liu, Z., & Zhang, B. (2021). Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method in karst groundwater quality evaluation: A case study of Cengong county. *Earth Science Informatics*, 14(2), 1101–1109. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00611-8>

Zhao, J., Sun, G., & Webster, C. (2022). Does China-Pakistan Economic Corridor improve connectivity in Pakistan? A protocol assessing the planned transport network infrastructure. *Journal of Transport Geography*, 100, 103327. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103327>

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Silva, G. H. N., Geisenhoff, L. O., Santos, R. C., Motomiya, A. V. de A., Gomes, E. P., & Jordan, R. A. Aumento da viabilidade econômica de obras rodoviárias por meio de um modelo multicritério baseado em lógica fuzzy. *Holos*, 6(41), 1-21. <https://doi.org/10.15628/holos.2025.15774>

SOBRE OS AUTORES

Guth Halley Nogueira Silva

Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD); Engenheiro Civil e Gestor de Contratos na RR Terraplenagem: BRASÍLIA, DF (Brasil); Membro do Grupo Certificado pelo CNPq em Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). Email: guthhalley.eng@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-1304-2500>

Luciano Oliveira Geisenhoff

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA); Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados/PPGEA-UFGD (Brasil); Membro do Grupo Certificado CNPq Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). Email: lucianogeisenhoff@ufgd.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5907-5870>

Rodrigo Couto Santos

Doutor em Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP); Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrônoma da Universidade Federal da Grande Dourados/PPGEA-UFGD (Brasil); Líder do Grupo Certificado CNPq Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). Email: rodrigocouto@ufgd.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4585-9305>

Anamari Viegas de Araújo Motomiya

Doutor em Fitotecnia pela Universidade de São Paulo (USP); Pós-Doutorado na USP; Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrônômica da Universidade Federal da Grande Dourados/PPGEA-UFGD (Brasil); Membro do Grupo Certificado CNPq Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). Email:

anamarimotomiya@ufgd.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2170-8676>

Eder Pereira Gomes

Doutor em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP); Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrônômica da Universidade Federal da Grande Dourados/PPGEA-UFGD (Brasil); Membro do Grupo Certificado CNPq Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). Email:

edergomes@ufgd.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4049-790X>

Rodrigo Aparecido Jordan

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP); Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados/PPGEA-UFGD (Brasil); Membro do Grupo Certificado CNPq Tecnologias Aplicadas à Sustentabilidade Agrícola (TASA). Email:

rodrigojordan@ufgd.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-4461>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Parecerista *Ad Hoc*: Maikon Alexandre Kremer



Recebido: 27 de Julho de 2023

Aceito: 16 de maio de 2025

Publicado: 26 de dezembro de 2025