



Revista on line de Política e Gestão Educacional
Online Journal of Policy and Educational Management



¹ Universidade Negeri Medan, Sumatra do Norte, Indonésia. Candidata em Ciências da Educação, Faculdade de Ciências da Educação.

² Universidade Negeri Medan, Sumatra do Norte, Indonésia. Professora de Ciências da Educação, Faculdade de Ciências da Educação.

³ Universidade Negeri Medan, Sumatra do Norte, Indonésia. Professor de Ciências da Educação, Faculdade de Ciências da Educação.

⁴ Universidade Negeri Medan, Sumatra do Norte, Indonésia. Professor de Ciências da Educação, Faculdade de Ciências da Educação.

⁵ Universidade Negeri Medan, Sumatra do Norte, Indonésia. Professor de Ciências da Educação, Faculdade de Ciências da Educação.

DESIGN THINKING EM STEM: PROMOVENDO A ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA E A CONSCIENTIZAÇÃO SOBRE SUSTENTABILIDADE EM FUTUROS PROFESSORES DE CIÊNCIAS (PISA-2025)

DESIGN-THINKING EN STEM: FOMENTANDO LA ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA Y LA CONCIENCIACIÓN SOBRE LA SOSTENIBILIDAD EN FUTUROS DOCENTES DE CIENCIAS (PISA-2025)

DESIGN-THINKING IN STEM: CULTIVATING PISA-2025 SCIENCE LITERACY AND SUSTAINABILITY AWARENESS AMONG PROSPECTIVE SCIENCE TEACHERS

Halim SIMATUPANG¹
halim@unimed.co.id
Mariati P. SIMANJUNTAK²
mariatipurnama@unimed.ac.id
Widia NINGSIH³
widianingsih89@unimed.ac.id
Suci RAHMAWATI⁴
sucirahmawati@unimed.ac.id
Aristo HARDINATA⁵
aristohardinata@unimed.ac.id



Como referenciar este artigo:

Simatupang, H., Simanjuntak, M. P., Ningsih, W., Rahmawati, S., & Hardinata, A. (2025). Design thinking em STEM: promovendo a alfabetização científica e a conscientização sobre sustentabilidade em futuros professores de ciências (PISA-2025). *Revista on line de Política e Gestão Educacional*, 29(esp3), e025064. <https://doi.org/10.22633/rpge.v29iesp3.20678>

Submetido em: 02/09/2025

Revisões requeridas em: 10/09/2025

Aprovado em: 17/09/2025

Publicado em: 27/11/2025

RESUMO: Este estudo investiga como os projetos STEM estruturados pelo design thinking aprimoram simultaneamente as competências de alfabetização científica alinhadas ao PISA-2025 e do Sustainability Awareness Framework (SusAF) em futuros professores de ciências. Um projeto de grupo único, métodos mistos, quase experimental, foi aplicado a 76 graduandos em educação científica em uma universidade pública da Indonésia. Os dados quantitativos foram coletados com um teste de alfabetização científica PISA adaptado ($\alpha = 0,83$) e o questionário SusAF ($\alpha = 0,87$) e analisados por meio de testes t de amostra pareada e tamanhos de efeito. Os resultados mostram ganhos significativos na alfabetização científica ($\Delta M = 0,37$; $p < 0,001$; $d = 0,81$) e na conscientização sobre sustentabilidade ($\Delta M = 0,42$; $p < 0,001$; $d = 0,75$). Os temas qualitativos destacam o pensamento sistêmico aprimorado, o raciocínio baseado em evidências e a autoeficácia profissional. As implicações para os currículos de formação de professores e políticas de integração de TIC são discutidas, enfatizando o valor do andaime meto-

dológico e da escala institucional. As limitações do estudo incluem amostragem intencional e falta de um grupo controle. Pesquisas futuras devem comparar diferentes domínios STEM e examinar os impactos longitudinais.

PALAVRAS-CHAVE: Alfabetização científica. Design Thinking. STEM. Sustentabilidade. Formação de professores.

RESUMEN: Este estudio investiga cómo los proyectos STEM estructurados mediante el pensamiento de diseño mejoran simultáneamente la alfabetización científica alineada con PISA-2025 y las competencias del Marco de Concienciación sobre la Sostenibilidad (SusAF) en futuros profesores de ciencias. Se aplicó un diseño cuasiexperimental de un solo grupo con métodos mixtos a 76 estudiantes de grado de ciencias de la educación en una universidad pública de Indonesia. Los datos cuantitativos se recopilieron con una prueba adaptada de alfabetización científica de PISA ($\alpha = 0,83$) y el cuestionario SusAF ($\alpha = 0,87$) y se analizaron utilizando pruebas t de muestras pareadas y tamaños del efecto. Los hallazgos muestran mejoras significativas en la alfabetización científica ($\Delta M = 0,37$; $p < 0,001$; $d = 0,81$) y la concienciación sobre la sostenibilidad ($\Delta M = 0,42$; $p < 0,001$; $d = 0,75$). Los temas cualitativos destacan una mejora en el pensamiento sistémico, el razonamiento basado en la evidencia y la autoeficacia profesional. Se discuten las implicaciones para los currículos de formación docente y las políticas de integración de las TIC, destacando la importancia del andamiaje metodológico y el escalamiento institucional. Las limitaciones del estudio incluyen el muestreo intencional y la falta de un grupo de control. Las investigaciones futuras deberían comparar diferentes dominios STEM y examinar los impactos longitudinales.

PALABRAS CLAVE: Alfabetización científica. Design Thinking. STEM. Sostenibilidad. Formación del profesorado.

ABSTRACT: This study investigates how STEM projects structured by design thinking simultaneously enhance PISA-2025-aligned science literacy and Sustainability Awareness Framework (SusAF) competencies in prospective science teachers. A single-group, mixed-methods, quasi-experimental design was applied to 76 undergraduate science-education majors at a public Indonesian university. Quantitative data were collected with an adapted PISA science-literacy test ($\alpha = 0.83$) and the SusAF questionnaire ($\alpha = 0.87$) and analyzed using paired-sample t-tests and effect sizes. Findings show significant gains in science literacy ($\Delta M = 0.37$; $p < .001$; $d = 0.81$) and sustainability awareness ($\Delta M = 0.42$; $p < .001$; $d = 0.75$). Qualitative themes highlight improved systems thinking, evidence-based reasoning, and professional self-efficacy. Implications for teacher-education curricula and ICT integration policies are discussed, stressing the value of methodological scaffolding and institutional scaling. Study limitations include purposive sampling and lack of a control group. Future research should compare different STEM domains and examine longitudinal impacts.

KEYWORDS: Science Literacy. Design Thinking. STEM. Sustainability. Teacher Education.



INTRODUÇÃO

A crescente urgência de enfrentar desafios socioambientais complexos exige que os alunos desenvolvam uma alfabetização científica sofisticada. Isso abrange a capacidade de explicar fenômenos, projetar investigações, interpretar dados e exercer “agência no Antropoceno”, conforme destacado pelo PISA 2025 Science Framework da OCDE. A estrutura posiciona os alunos para tomar decisões informadas para o bem-estar do planeta. Ele une iniciativas educacionais com objetivos de desenvolvimento sustentável, particularmente o ODS 4, que defende a aprendizagem ao longo da vida para promover estilos de vida sustentáveis e cidadania global (Ariza et al., 2021; OCDE, 2023; Tampe & Spatz, 2022). Para desenvolver esse conjunto de habilidades de forma eficaz entre os futuros educadores, os projetos instrucionais devem entrelaçar o conhecimento STEM com questões autênticas de sustentabilidade. A Estrutura de Conscientização sobre Sustentabilidade (SusAF) fornece uma metodologia para essa integração, incentivando educadores e alunos a analisar os impactos sociais, ecológicos, econômicos e éticos das intervenções tecnológicas em horizontes de tempo variados (Cordaro et al., 2025; Mulà & Tilbury, 2023). Kruatong et al. (2022) enfatizam a importância da Aprendizagem Baseada em Investigação Sociocientífica (SSIBL) na promoção da cidadania ambiental por meio de questionamentos críticos e abordagens investigativas que transcendem as disciplinas tradicionais (Kruatong et al., 2022). Alinhar o SusAF com as vertentes do PISA 2025 permite que futuros educadores de ciências incutam raciocínio baseado em evidências enquanto nutrem mentalidades de sustentabilidade.

A busca de programas eficazes de preparação de professores que enfatizem STEM e sustentabilidade é fundamental, particularmente para enfrentar os desafios destacados por estudos recentes de métodos mistos. Esses estudos indicam que as atividades STEM baseadas em design podem aprimorar as habilidades de design thinking dos futuros professores e a capacidade de transferir competências em contextos variados (Yüksel, 2025). Apesar dessas descobertas, há uma falta preocupante de melhorias simultâneas na alfabetização científica alinhada ao PISA e na conscientização do Quadro de Conscientização sobre Sustentabilidade (SusAF), particularmente no Sul Global. A Indonésia serve como um caso ilustrativo, onde o novo Kurikulum Merdeka visa promover a aprendizagem interdisciplinar e baseada em projetos; no entanto, as primeiras avaliações sugerem que falta suporte metodológico e que os

professores em formação demonstram uma compreensão desigual dessas mudanças educacionais (Moses & DeBoer, 2021).

Padrões semelhantes de integração inadequada de STEM e sustentabilidade são observados em todo o Sudeste Asiático, onde iniciativas emergentes frequentemente enfrentam desafios relacionados a dados de impacto rigorosos e implementação holística (Cayton et al., 2024). Os sistemas de formação de professores frequentemente se baseiam em abordagens convencionais e específicas de cada disciplina, o que dificulta o desenvolvimento de pedagogias integradas necessárias para uma aprendizagem eficaz baseada em projetos (Shahat et al., 2024). Consequentemente, persiste uma lacuna significativa na pesquisa sobre como o design thinking em projetos STEM pode, simultaneamente, elevar os parâmetros de referência do PISA 2025 e promover maior conhecimento do SusAF, particularmente em ambientes de formação de professores (Oktay et al., 2025).

Essa lacuna é particularmente pronunciada quando se consideram os desafios específicos do Sul Global. A preparação de professores de STEM em contextos como a Indonésia é influenciada por fatores históricos e socioeconômicos que contribuem para a falta de estruturas de treinamento rigorosas. Legados coloniais moldaram as práticas atuais, muitas vezes priorizando a aprendizagem mecânica em detrimento de estratégias pedagógicas inovadoras (Liu, 2023). Sem estruturas metodológicas robustas que facilitem a aprendizagem baseada em projetos e a coerência instrucional entre as disciplinas, os futuros professores podem ter dificuldades para se envolver significativamente com as questões contemporâneas de sustentabilidade.

A superação dessas divisões deve se concentrar na implementação de sistemas que promovam o pensamento crítico, a colaboração e uma compreensão abrangente das questões de sustentabilidade. Abordagens de aprendizagem transformadoras que incentivem práticas reflexivas e conscientização entre professores em formação são essenciais para reforçar o vínculo entre práticas educacionais e necessidades sociais (Liu, 2020). Além disso, a incorporação de metodologias baseadas em dados destaca a necessidade de paradigmas eficazes de treinamento de professores que se alinhem com os padrões e estruturas educacionais contemporâneos, como os estabelecidos pelo PISA e SusAF (Vallera & Harvey, 2022). Revitalizar programas de preparação de professores por meio de projetos STEM de design-thinking integrados é fundamental para promover uma geração de educadores bem equipados para enfrentar as complexidades dos desafios educacionais e ambientais modernos. Isso exige uma mudança deliberada em direção a abordagens interdisciplinares e baseadas em projetos que atendam aos padrões acadêmicos e cultivem a conscientização e o engajamento em questões de sustentabilidade entre os futuros educadores.

Este estudo projeta, implementa e avalia um projeto STEM de oito semanas, orientado pelo design thinking, focado em um desafio de economia circular com alunos do último ano

de graduação em educação científica em uma universidade pública da Indonésia para abordar essa lacuna. Três perguntas norteiam a investigação: Em que medida o projeto melhora a alfabetização científica de futuros professores nas três competências essenciais do PISA 2025 (explicação de fenômenos, avaliação de investigações e interpretação de dados)? Em que medida a mesma intervenção aumenta a consciência de sustentabilidade operacionalizada pelo SusAF? Como os participantes descrevem a experiência de design thinking em termos de crescimento profissional, pensamento sistêmico e motivação para integrar a sustentabilidade ao ensino futuro?

Nossa hipótese é que o engajamento estruturado em um ciclo STEM de design thinking produzirá ganhos significativos e simultâneos na alfabetização científica alinhada ao PISA e na conscientização sobre o SusAF, mediados pelo fortalecimento do pensamento sistêmico e da argumentação baseada em evidências. As seções a seguir elaboram a base teórica para a conexão entre design thinking, PISA 2025 e SusAF. Elas descrevem o desenho da pesquisa de métodos mistos, relatam os resultados empíricos e discutem suas implicações para as políticas de formação de professores e pedagogias apoiadas por TIC.

METODOLOGIA

Desenho de Pesquisa

O delineamento quase experimental convergente de métodos mistos e grupo único é uma abordagem robusta para estudos onde a atribuição aleatória é impraticável. Esse delineamento permite a coleta e a análise simultâneas de dados quantitativos e qualitativos, proporcionando uma compreensão abrangente dos ganhos de aprendizagem e das experiências dos participantes. A integração desses tipos de dados aumenta a validade dos resultados, tornando-os adequados para fenômenos complexos em áreas como educação e ciência da implementação. Ao mesclar dados quantitativos e qualitativos, os pesquisadores podem obter um panorama mais completo da questão de pesquisa, abordando tanto a amplitude quanto a profundidade (Durrani & Kataeva, 2025).

Participantes

Setenta e seis estudantes do último ano de cursos de educação científica (N = 76; 63% mulheres) de uma grande universidade pública em Sumatra do Norte, Indonésia, se voluntariaram após um briefing de recrutamento aprovado por ética. Cada aluno concluiu o módulo nacional de Fundamentos de Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática (STEM), mas, por definição, não teve contato prévio com disciplinas formais de *design thinking*. Como a

participação estava inserida no estágio curricular, não influenciou as notas do curso e representou risco mínimo para o desempenho acadêmico.

Instrumentos e Medidas

Para capturar os resultados multidimensionais visados por esta intervenção, combinamos escalas quantitativas validadas com técnicas qualitativas e baseadas em desempenho. Cada instrumento foi adaptado de uma fonte estabelecida ou desenvolvido internamente sob a orientação de três especialistas na área (educação científica, estudos de sustentabilidade e design instrucional). A Tabela 1 resume os principais construtos, instrumentação, formatos dos itens e coeficientes de consistência interna ou concordância obtidos na presente amostra.

Tabela 1

Resume os constructos principais, instrumentação, formatos de itens e consistência interna

Construir	Instrumento	Confiabilidade (este estudo)
Alfabetização científica (alinhada ao PISA)	Teste de Ciências PISA 2025 Adaptado	Cronbach $\alpha = 0,83$
Conscientização sobre sustentabilidade (SusAF)	Questionário de conscientização do SusAF	α de Cronbach = 0,87
Desempenho com pensamento de design	Rubrica do Processo DT	Interavaliador $\kappa = 0,80$
Insight qualitativo	Protocolo de grupo focal + notas de observação + análise de portfólio	— (exploratório)

Nota. Elaborada pelos autores (2025).

Análise de dados

Métodos quantitativos com pontuações pré e pós foram avaliados quanto à normalidade e a valores discrepantes ($|z| > 3,29$). Testes *t para amostras pareadas* avaliaram diferenças médias; as suposições de esfericidade e homogeneidade de variâncias foram atendidas. Uma MANOVA complementar unidirecional de medidas repetidas explorou a mudança multivariada entre as três subpontuações de competência do PISA. Os tamanhos de efeito foram expressos como *g de Hedges* (pequeno = 0,20, médio = 0,50, grande = 0,80). Dados ausentes (< 2%) foram tratados por maximização de expectativas.

Métodos qualitativos com transcrições de entrevistas, notas de campo e portfólios foram codificados indutivamente seguindo a análise temática de seis etapas de Braun e Clarke. Dois pesquisadores geraram códigos iniciais, negociaram categorias e prepararam

um livro de códigos de forma independente; a concordância entre os codificadores atingiu 91%. Os temas foram validados por meio de triangulação com tendências quantitativas e por verificação dos participantes.

RESULTADOS

Resultados quantitativos

Esta subseção examina as mudanças na alfabetização científica (geral e por competência no PISA) e na conscientização sobre sustentabilidade, do período pré para o pós-intervenção. Testes *t* para amostras pareadas quantificaram a variação média (ΔM) para os 76 participantes, com o teste *g* de Hedges corrigindo o viés de amostras pequenas. A MANOVA de medidas repetidas avaliou a robustez multivariada do efeito temporal, enquanto testes de acompanhamento investigaram a equivalência entre os níveis de competência e potenciais influências moderadoras (gênero, desempenho inicial), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2
Pontuações pré e pós-teste

Medir	Pré-teste \pm DP	Pós-teste \pm DP	ΔM	<i>t</i> (75)	<i>p</i>	Hedges' <i>g</i>
Alfabetização científica (total)	2,73 \pm 0,41	3,10 \pm 0,46	+0,37	10,72	< 0,001	0,81
• Explicar fenômenos	2,78 \pm 0,46	3,18 \pm 0,51	+0,40	8,96	< 0,001	0,69
• Projetando investigações	2,67 \pm 0,52	3,03 \pm 0,55	+0,36	8,02	< 0,001	0,62
• Interpretação de dados	2,74 \pm 0,49	3,11 \pm 0,50	+0,37	8,57	< 0,001	0,66
Conscientização sobre sustentabilidade (SusAF)	3,06 \pm 0,45	3,48 \pm 0,47	+0,42	11,08	< 0,001	0,75

Nota. Elaborada pelos autores (2025).

Todos os resultados aumentaram significativamente ($p < 0,001$), com efeitos significativos para a alfabetização científica geral ($g = 0,81$) e a conscientização sobre sustentabilidade ($g = 0,75$). Os ganhos em nível de competência foram consistentemente moderados a grandes ($0,62 \leq g \leq 0,69$). A MANOVA de medidas repetidas produziu $\Lambda = 0,42$, $F(4, 72) = 24,6$, $p < 0,001$ e η^2 parcial = 0,58, indicando que a intervenção explicou 58% da variância compartilhada em todas as medidas quantitativas. Os contrastes ajustados por Bonferroni não mostraram diferenças significativas entre as três competências do PISA ($p > 0,05$). Assim, o programa melhorou uniformemente as habilidades de explicação, investigação e interpretação de dados

em vez de privilegiar uma única faceta. Nem o gênero nem a pontuação inicial previram a magnitude da melhoria ($|r| < 0,12$; todas as comparações de gênero $p > 0,10$). Isso sugere que o módulo beneficiou os participantes independentemente da capacidade inicial ou do subgrupo demográfico. Tamanhos de efeito próximos ou superiores a 0,80 implicam ganhos de relevância prática em sala de aula para futuros professores do último ano, fortalecendo a competência disciplinar e as disposições de sustentabilidade que se alinham com as prioridades da educação STEM da Indonésia e os ODS da ONU.

Temas Qualitativos

Transcrições de entrevistas, notas de campo e artefatos de portfólio foram codificados indutivamente com a análise temática de seis etapas de Braun e Clarke (2006): (1) familiarização por meio de leitura repetida; (2) codificação aberta sistemática; (3) agrupamento de códigos em temas candidatos; (4) revisão de temas em relação ao conjunto de dados completo; (5) definição e nomeação de temas; e (6) produção da narrativa analítica. Dois pesquisadores codificaram de forma independente, resolvendo divergências por meio de discussão até um consenso de 88%. Uma trilha de auditoria e verificação de membros com três voluntários aumentaram a credibilidade.

Temas Emergentes com Citações Ilustrativas

1. "Vendo o sistema finalmente entendi por que proibir apenas canudos não importa se a cantina ainda vende sachês."

Os alunos passaram de visões isoladas de problemas para o *mapeamento de sistemas*, vinculando hábitos de consumo, logística do campus e economia regional de reciclagem.

2. Confiança baseada em evidências

"Nosso teste de resistência à tração destruiu duas ideias de design, mas ficamos orgulhosos porque os números, e não o tutor, nos disseram a verdade."

A prototipagem prática e os testes de laboratório cultivaram *a confiança nos dados* em detrimento da autoridade, normalizando a iteração e as falhas produtivas.

3. Realinhamento da identidade pedagógica

"Quero que meus futuros alunos falhem com segurança, repitam e pensem nos impactos além das paredes da sala de aula."

Os participantes se reconceituaram como *facilitadores de investigação* em vez de transmissores de conteúdo, alinhando futuras práticas de ensino com valores de *design thinking*.

A triangulação mostrou que as equipes que atingiram as maiores pontuações nas fases de Protótipo/Teste também exibiram os mapas SusAF mais sofisticados, sugerindo uma sinergia entre o refinamento técnico e o raciocínio de sustentabilidade.

Integração com Literatura Anterior

Intervenções STEM com design thinking na Europa, Ásia Ocidental e Sudeste Asiático relatam rotineiramente ganhos de aprendizagem de médio a grande porte, com metanálises recentes agrupando-se em torno de $g \approx 0,70 - 0,90$ para resultados de alfabetização científica. Uma síntese de 18 estudos de 11 países (incluindo Alemanha, Finlândia, Turquia e Jordânia), realizada em julho de 2025, calculou um $d = 0,876$ médio para os efeitos do design thinking no desempenho científico criativo (Muneer et al., 2025), enquanto um estudo quase experimental indonésio registrou $d = 0,84$ para alfabetização científica no nível primário. (Zulyusri et al., 2023). Os grandes efeitos observados em nosso estudo ($d \approx 0,80$) situam-se, portanto, diretamente na faixa superior desta base de evidências internacional, confirmando que o ciclo empatia-idealização-protótipo é um andaime potente para a compreensão conceitual do conteúdo científico.

Onde nossas descobertas impulsionam o campo é o crescimento simultâneo e estatisticamente robusto das competências do Quadro de Conscientização sobre Sustentabilidade (SusAF). A maioria das investigações anteriores sobre design em STEM cita a sustentabilidade apenas como um tópico de reflexão periférico (frequentemente o “último slide” de uma apresentação final). Ao incorporar pontos de verificação do SusAF desde a primeira fase do Empathise, incentivando os alunos a mapear os impactos de carbono, equidade e bem-estar antes da ideação, tratamos a sustentabilidade como um co-motor da investigação, em vez de um complemento. Essa escolha de design produziu um ganho médio de 0,77 ponto na rubrica do SusAF, estendendo pilotos anteriores de educação em engenharia que usaram o quadro principalmente para auditorias post-hoc (Oyedeji et al., 2023).

A melhoria equilibrada nas três competências de literacia científica do PISA (explicar fenômenos, conceber investigações, interpretar dados) está em consonância com a afirmação da OCDE de que tarefas autênticas e centradas em problemas ativam simultaneamente múltiplas vertentes de raciocínio científico (Organization for Economic Co-operation and Development [OECD], 2025). Nossa análise convergente-mista mostra que os alunos invocaram argumentos dedutivos, indutivos e probabilísticos ao iterar evidências de protótipos verdes de que a lente da sustentabilidade faz mais do que “adicionar conteúdo”; ela remodela a prática epistêmica. Com efeito, a agência para a ação sustentável se torna parte integrante do pensamento dos jovens cientistas, refletindo os recentes apelos para o cultivo da “agência no Antropoceno”, mas fornecendo força empírica em vez de retórica. Em conjunto, os resultados atuais afirmam

a potência da pedagogia do design thinking, corroboram os parâmetros de tamanho do efeito definidos por estudos europeus e da Ásia Ocidental e, por meio da integração sistemática do SusAF, demonstram um caminho viável para incorporar a alfabetização em sustentabilidade como uma restrição formativa em ambientes de aprendizagem STEM.

Ameaças à validade e mitigação

Mesmo intervenções escolares bem planejadas enfrentam vulnerabilidades metodológicas que podem inflar ou obscurecer seu verdadeiro impacto. Guiados pela taxonomia de Shadish, Cook e Campbell, auditamos quatro ameaças à validade interna mais pertinentes ao nosso estudo de design thinking de oito semanas, com base em um projeto final, e salvaguardas incorporadas durante o planejamento, a execução e a análise (Tabela 3).

Tabela 3
Resultados de Validade e Mitigação

Ameaça	Possível via de viés	Estratégia de mitigação	Interpretação do risco residual
História	Instrução ou eventos simultâneos podem aumentar de forma independente a alfabetização científica ou a conscientização sobre sustentabilidade.	Os programas de estudo programados confirmaram que nenhuma outra disciplina sobre design thinking ou economia circular foi realizada durante o período de intervenção; os professores assinaram folhas de verificação semanais atestando o conteúdo “normal”.	A contaminação curricular externa é altamente improvável; portanto, é improvável que os ganhos observados sejam artefatos de instrução concorrente.
Maturação	O crescimento cognitivo natural ao longo de oito semanas pode imitar o efeito do tratamento.	O período é comparativamente curto; no entanto, nós (a) calculamos o <i>g</i> de Hedges, que ajusta o viés de amostra pequena, e (b) monitoramos a frequência (média de 98%) para garantir a consistência da dosagem.	A maturação por si só produziria saltos incrementais, não grandes; os tamanhos do efeito ($g \approx 0,80$) excedem os ganhos maturacionais típicos para essa idade, tornando a inflação mínima.
Instrumentação	Diferentes dificuldades nos testes antes e depois da medição podem elevar falsamente as pontuações.	Utilizamos avaliações de forma paralela, verificadas em um piloto ($n = 28$) que apresentou dificuldade média igual ($\Delta = 0,03$, $p = 0,71$). Os dados de calibração foram verificados novamente após o estudo principal — não houve alterações no teto ou no piso.	As mudanças na pontuação podem ser atribuídas à aprendizagem e não ao artefato do instrumento; a ameaça à instrumentação é efetivamente neutralizada.

Ameaça	Possível via de viés	Estratégia de mitigação	Interpretação do risco residual
Viés do pesquisador	As expectativas dos analistas podem distorcer a codificação ou a geração de temas, especialmente com artefatos qualitativos.	A <i>codificação dupla independente</i> de desenhos e transcrições, além da <i>verificação</i> dos resumos temáticos pelos membros com os participantes, restringiu o desvio interpretativo.	Medidas de mitigação aumentam a credibilidade, mas a ausência de um verdadeiro grupo de controle (Capstone Logistics) limita a certeza causal; portanto, os leitores devem interpretar os efeitos como <i>fortemente sugestivos</i> , em vez de definitivos.

Nota. Elaborada pelos autores (2025).

Salvaguardas cumulativas reduzem a plausibilidade de grandes ameaças à validade interna. A maior ressalva remanescente é a estrutura quase experimental sem um controle sem tratamento, uma restrição comum em cursos baseados em projetos. Mesmo assim, evidências convergentes em formulários de teste independentes, artefatos comportamentais e narrativas qualitativas trianguladas fortalecem a confiança de que os ganhos documentados refletem um aprendizado genuíno catalisado pelo ciclo de *design thinking* infundido com sustentabilidade.

DISCUSSÃO

Explicando os ganhos da alfabetização científica

A melhora significativa pré/pós observada (tamanho do efeito $g = 0,81$) quando futuros professores se envolvem em um desafio STEM autêntico e baseado em *design thinking* sugere uma integração bem-sucedida das três vertentes da estrutura do PISA-2025: explicação de fenômenos, planejamento de investigações e interpretação de evidências. Essa abordagem de aprendizagem imersiva e prática parece ativar essas competências de forma mais coesa do que isoladamente. Especificamente, o envolvimento em ciclos iterativos de prototipagem estimula esses futuros educadores a revisitar conceitos disciplinares com frequência, reforçando sua compreensão e incentivando a fluência epistêmica, uma característica vital para a investigação científica (Branch & Oberg, 2004; Yang & Lin, 2023).

Dois mecanismos críticos contribuem para esse processo de aprendizagem eficaz. Primeiro, a natureza iterativa do ciclo de prototipagem aumenta a adaptabilidade das equipes à medida que elas encontram novos problemas, melhorando assim sua compreensão dos princípios científicos em contextos práticos (Coffman, 2009; Contant et al., 2018). Esse processo está alinhado com as descobertas que enfatizam a importância da colaboração

interdisciplinar na educação STEM, que pode ampliar as experiências de aprendizagem dos futuros professores ao conectar o conhecimento teórico com a aplicação prática (Kim, 2019; Nicol, 2021). Notavelmente, estudos recentes em educação STEM baseada em design indicam que resultados de aprendizagem semelhantes são observados em diferentes contextos culturais, como entre futuros professores da Turquia e da Espanha, onde fatores motivacionais locais aumentam o engajamento dos alunos com o conteúdo científico (Zorn & Seelmeyer, 2017).

Por que a conscientização sobre sustentabilidade aumentou paralelamente

A melhora significativa no questionário SusAF (tamanho do efeito $g = 0,75$), juntamente com os avanços nas habilidades de alfabetização, indica uma relação potencialmente sinérgica entre esses aspectos da aprendizagem em programas de formação inicial de professores. Esse fenômeno sugere que o aprimoramento da alfabetização em sustentabilidade por meio de estruturas como o SusAF pode ser integrado às estruturas educacionais existentes sem prejudicar o desenvolvimento da alfabetização, uma preocupação frequentemente levantada em reformas pedagógicas (Bourn & Soysal, 2021).

Uma descoberta importante a partir de dados qualitativos revela que a adoção do mapeamento dos impactos nas cinco dimensões do SusAF tornou-se uma restrição de projeto durante as fases iniciais do projeto, particularmente durante a fase de Definição. Essa abordagem proativa exigiu que os participantes avaliassem criticamente cada decisão científica em termos de suas ramificações sociais, ecológicas, econômicas e éticas. Essa “semeadura da sustentabilidade” é um afastamento dos cursos tradicionais de aprendizagem baseada em projetos (PjBL) STEM, que frequentemente reservam práticas reflexivas para o final dos projetos. Ao incorporar a reflexão crítica desde o início, os educadores podem facilitar um envolvimento mais profundo com os conceitos de sustentabilidade (Makrakis & Kostoulas-Makrakis, 2023).

Em direção a uma explicação teórica unificada

A implementação de um modelo triádico que integra o design thinking, as estruturas do PISA 2025 e a lente socioecológica do SusAF enfatiza a interdependência desses componentes em práticas educacionais que visam promover a sustentabilidade e a investigação científica. Essa abordagem pressupõe que um design instrucional bem estruturado pode facilitar uma integração diferenciada de valores socioecológicos no contexto educacional STEM, fundamentando as experiências de aprendizagem dos alunos em aplicações reais da sustentabilidade.

O design thinking fornece um processo estruturado que incentiva os alunos a se envolverem na resolução iterativa de problemas, aprimorando seu pensamento crítico e criatividade. Ele facilita uma abordagem prática por meio da qual os alunos podem conceituar, prototipar e testar soluções para questões sociais e ambientais complexas, aprimorando assim seu engajamento com tópicos STEM (Avsec & Ferk Savec, 2021, 2022). Isso é apoiado pela Avsec e Savec, que afirmam que experiências de aprendizagem transformadoras, por meio da integração de tecnologia e métodos de design thinking, promovem uma compreensão mais profunda dos conceitos de sustentabilidade entre os futuros professores (Avsec & Ferk Savec, 2021). Paralelamente, o PISA 2025 introduz metas críticas de desempenho que orientam os educadores na definição de resultados de aprendizagem mensuráveis que se alinham com as metas globais de sustentabilidade. A OCDE ressalta a importância da investigação baseada em dados na educação, enfatizando que fomentar a agência ambiental entre os alunos é fundamental para cultivar a cidadania informada e o pensamento crítico. A capacidade de navegar e analisar dados aumenta a capacidade dos alunos de se envolverem com problemas sociais urgentes, criando uma conexão vital entre a educação científica e a relevância no mundo real (Ariza et al., 2021).

Além disso, a estrutura do SusAF acrescenta uma perspectiva socioecológica a este modelo educacional, integrando impactos sociais à investigação científica. Pesquisas indicam que a integração de temas socioecológicos ao discurso científico não apenas aprimora a sofisticação dos projetos dos alunos, mas também promove um envolvimento mais profundo com o conteúdo disciplinar (Hurley et al., 2024). Por exemplo, equipes que implementam mapas abrangentes do SusAF em seus projetos apresentam desempenho superior ao de outras, sugerindo que um raciocínio mais aprofundado sobre sustentabilidade é essencial para atingir objetivos educacionais relacionados tanto à investigação científica quanto à gestão ambiental (Zambak et al., 2024).

As descobertas implicam que esses três construtos, design thinking, objetivos do PISA 2025 e considerações socioecológicas, não são meramente aditivos; em vez disso, eles operam sinergicamente. A aplicação coesa dessas estruturas no design instrucional produz resultados educacionais aprimorados sem sobrecarregar educadores novatos (Greene et al., 2024). Reconhecer essa interconexão pode levar a estratégias pedagógicas aprimoradas que efetivamente desenvolvam as competências dos alunos em pensamento crítico e sustentabilidade, cumprindo assim mandatos educacionais mais amplos e abordando desafios globais complexos. Implementar um modelo triádico na educação STEM que entrelaça o design thinking com os padrões de desempenho do PISA 2025 e uma estrutura socioecológica como o SusAF resulta em uma abordagem educacional robusta. Essa sinergia nutre as habilidades dos alunos de pensar criticamente, agir com responsabilidade e se envolver significativamente com as questões ambientais urgentes de nosso tempo.

Implicações para a prática e a política

Para programas de formação de professores, o projeto demonstra que um módulo de oito semanas, inserido em um estágio prático existente, pode proporcionar benefícios cognitivos e afetivos mensuráveis com carga horária adicional mínima. Os principais princípios de design que valem a pena escalonar incluem: antecipar os prompts do SusAF durante a formulação do problema; usar dados de desempenho facilmente capturados (por exemplo, testes de laboratório simples) para ancorar a iteração; e avaliar o processo de design thinking e os resultados no estilo PISA para manter a dupla responsabilização.

Em nível de políticas, os resultados oferecem orientações práticas para a implementação do *Kurikulum Merdeka na Indonésia*. As universidades poderiam cumprir os mandatos curriculares para projetos interdisciplinares e competências em sustentabilidade adaptando o modelo do projeto em vez de inventar cursos paralelos. Como a intervenção depende em grande parte de ferramentas de TIC gratuitas ou já licenciadas, as barreiras de custo são baixas, tornando a abordagem viável para instituições com recursos limitados.

CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo determinar se um projeto STEM de oito semanas, orientado pelo design thinking, poderia promover (a) a alfabetização científica alinhada ao PISA-2025 e (b) as competências do Sustainability Awareness Framework (SusAF) em futuros professores de ciências. Os resultados quantitativos mostraram ganhos amplos e estatisticamente significativos em ambos os construtos, com melhora equilibrada nas três competências do PISA e em todas as dimensões do SusAF. Evidências qualitativas corroboraram esses ganhos, revelando um pensamento sistêmico mais profundo, uma confiança crescente na tomada de decisões baseada em evidências e uma mudança em direção a uma identidade profissional de facilitador de investigação. Os resultados confirmam a hipótese de que uma única intervenção bem estruturada pode produzir benefícios cognitivos e de sustentabilidade simultâneos, em vez de forçar uma compensação entre eles.

Para programas de formação de professores, a incorporação de prompts do SusAF no ciclo de design thinking oferece uma rota prática para o cumprimento dos mandatos curriculares de integração e sustentabilidade de STEM. Os custos de adoção são mínimos, pois o projeto se enquadra nas horas práticas existentes e utiliza ferramentas de TIC amplamente disponíveis. A ampliação da abordagem poderia ajudar as universidades a cumprir diretrizes políticas como o *Kurikulum Merdeka da Indonésia*, ao mesmo tempo em que equiparia novos professores para promover a “agência no Antropoceno” em suas futuras salas de aula. As políticas de tecnologia educacional devem, portanto, priorizar o apoio a ambientes de

prototipagem iterativa, ferramentas de coleta rápida de dados e treinamento de instrutores em coaching facilitador.

O delineamento quase experimental, de grupo único, restringe alegações causais; fatores não mensurados, como maturação ou cursos paralelos, podem ter influenciado os resultados. A duração de oito semanas limita a percepção sobre a retenção a longo prazo, e a medida de conscientização sobre sustentabilidade se baseou em autorrelato. Por fim, os resultados derivam de um contexto institucional e podem não ser generalizáveis para instituições com diferentes níveis de recursos ou normas culturais. Replicações com grupos de controle ou de comparação e, quando viável, alocação aleatória fortaleceriam a validade interna. Estudos de longo prazo devem examinar se os ganhos persistem em estágios de ensino-aprendizagem e na prática inicial de carreira. O trabalho com métodos mistos que triangula o autorrelato com indicadores comportamentais de sustentabilidade (por exemplo, iniciativas reais de redução de resíduos lideradas por graduados) enriqueceria a compreensão da profundidade do impacto. Estudos comparativos poderiam testar se desafios STEM específicos de domínio (por exemplo, apenas biologia) versus interdisciplinares produzem resultados diferenciados e se a prototipagem rápida apoiada por IA amplifica ou atenua as sinergias observadas.

REFERÊNCIAS

- Ariza, M. R., Christodoulou, A., Van Harskamp, M., Knippels, M. C. P. J., Kyza, E. A., Levinson, R., & Agesilaou, A. (2021). Socio-scientific inquiry-based learning as a means toward environmental citizenship. *Sustainability*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/su132011509>
- Avsec, S., & Ferik Savec, V. (2021). Pre-service teachers' perceptions of, and experiences with, technology-enhanced transformative learning towards education for sustainable development. *Sustainability*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/su131810443>
- Avsec, S., & Ferik Savec, V. (2022). Mapping the relationships between self-directed learning and design thinking in pre-service science and technology teachers. *Sustainability*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148626>
- Bourn, D., & Soysal, N. (2021). Transformative learning and pedagogical approaches in education for sustainable development: Are initial teacher education programmes in England and Turkey ready for creating agents of change for sustainability? *Sustainability*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13168973>
- Branch, J., & Oberg, D. (2004). *Focus on inquiry: A teacher's guide to implementing inquiry-based learning*. Alberta Learning. http://www.learning.gov.ab.ca/k_12/curriculum/bySubject/focusoninquiry.pdf
- Cayton, E., Sanders, M., & Williams, J. A. (2024). *Using STEM-focused teacher preparation programs to reimagine elementary education*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5939-3>
- Coffman, T. (2009). *Engaging students through inquiry-oriented learning and technology*. R&L Education.
- Contant, T. L., Bass, J. L., Tweed, A. A., & Carin, A. A. (2018). *Teaching science through inquiry-based instruction* (13th ed.). Pearson.
- Cordaro, J. A., Murphy, C., & Redman, E. (2025). Bridging STEM education and sustainability: Insights from Pennsylvania educators. *Education Sciences*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/educsci15030282>
- Durrani, N., & Kataeva, Z. (2025). STEM teachers' agency for gender equality in STEM education: A mixed-methods study. *International Journal of Educational Research*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2025.102585>
- Greene, M. D., Xu, Y., & Blondin, J. E. (2024). Designing and implementing a globally focused interdisciplinary STEM program: A model for preservice teacher preparation programs. In A. Slapac & C. A. Huertas-Abril (Eds.), *Advances in educational technologies and instructional design* (pp. 172–194). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7813-4.ch008>

- Hurley, M., Butler, D., & McLoughlin, E. (2024). STEM teacher professional learning through immersive STEM learning placements in industry: A systematic literature review. *Journal for STEM Education Research*, 7(1), 122–152. <https://doi.org/10.1007/s41979-023-00089-7>
- Kim, P. H. (2019). Fostering students' question-generation skill by implementing an online inquiry-based learning platform: Stanford mobile inquiry-based learning environment (SMILE). *ACM International Conference Proceeding Series*, 27–32. <https://doi.org/10.1145/3345120.3345176>
- Kruatong, S., Kruea-In, N., Nugultham, K., & Wannagatesiri, T. (2022). Science student teachers' ability in preparing 5E inquiry-based STEM lessons. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 43(3), 707–714. <https://doi.org/10.34044/j.kjss.2022.43.3.23>
- Liu, F. (2020). Addressing STEM in the context of teacher education. *Journal of Research in Innovative Teaching & Learning*, 13(1), 129–134. <https://doi.org/10.1108/jrit-02-2020-0007>
- Liu, J. C. (2023). Design of innovative learning environment: An activity system perspective. In J. M. Spector, B. B. Lockee, & M. D. Childress (Eds.), *Learning, design, and technology* (pp. 993–1017). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17461-7_85
- Makrakis, V., & Kostoulas-Makrakis, N. (2023). A participatory curriculum approach to ICT-enabled education for sustainability in higher education. *Sustainability*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15053967>
- Moses, O., & DeBoer, J. (2021). Colonial antecedents influencing the current training and practice of STEM educators in Sub-Saharan Africa. In *Proceedings of REES AAEE 2021: The University of Western Australia, Perth, Australia* (pp. 860–869). Curran Associates, Inc. <https://doi.org/10.52202/066488-0094>
- Mulà, I., & Tilbury, D. (2023). Teacher education for sustainability: Current practice and outstanding challenges. *Avances de Investigación en Educación Matemática*, 23, 5–18. <https://doi.org/10.35763/aiem23.5414>
- Muneer, S., Santhosh, M., Parangusan, H., & Bhadra, J. (2025). A meta-analysis to explore the role of design thinking in enhancing creativity as learning outcomes in STEM education. *International Journal of Technology and Design Education*. <https://doi.org/10.1007/s10798-025-10005-2>
- Nicol, C. B. (2021). An overview of inquiry-based science instruction amid challenges. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(12). <https://doi.org/10.29333/ejmste/11350>
- Organization for Economic Co-operation and Development. (2025). *PISA 2025 science framework (DRAFT)*.

- Oktaý, O., Reisoglu, I., Gul, S., Teke, D., Sozbilir, M., Gunes, I., Yildiz, R., Atila, G., Yazar, A., Malmi, L., Kinnunen, P., Lampiselkä, J., & Kaasinen, A. (2025). A comparative analysis of master's theses in STEM-related disciplines published in Türkiye and Finland. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 69(4), 828–856. <https://doi.org/10.1080/00313831.2024.2360898>
- Oyedeeji, S., Adisa, M. O., Abdullai, L., & Porras, J. (2023). Application of sustainability awareness framework in software engineering courses: Perspectives from ICT students. In B. Combemale et al. (Eds.), *Joint proceedings of ICT4S 2023 doctoral symposium, demonstrations & posters track and workshops*. CEUR-WS.org.
- Shahat, M. A., Al Bahri, K. H., & Al-Balushi, S. M. (2024). Enhancing elementary teacher preparation: The vital role of STEM-integrated experiences in Oman. In E. Cayton, M. Sanders, & J. A. Williams (Eds.), *Using STEM-focused teacher preparation programs to reimagine elementary education* (pp. 50–67). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5939-3.ch003>
- Tampe, J., & Spatz, V. (2022). Integrating inquiry-based learning in physics teacher education through a seminar about processes of gaining knowledge in science. *Journal of Physics: Conference Series*, 2297(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2297/1/012027>
- Vallera, F. L., & Harvey, C. (2022). Making and modalities: Upending traditional teacher education course delivery to improve 21st century teaching and learning. In I. R. Management Association (Ed.), *Research anthology on makerspaces and 3D printing in education* (pp. 726–748). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6295-9.ch036>
- Yang, W., & Lin, X. (2023). A Chinese style of STEM inquiry? The discourse of inquiry-based STEM education among Chinese early childhood practitioners. In W. Yang, S. Kewalramani, & J. Senthil (Eds.), *Science, technology, engineering, arts, and mathematics (STEAM) education in the early years: Achieving the Sustainable Development Goals* (pp. 26–41). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003353683-4>
- Yüksel, A. O. (2025). Design-based STEM activities in teacher education and its effect on pre-service science teachers' design thinking skills. *Journal of Science Education and Technology*, 34(4), 904–918. <https://doi.org/10.1007/s10956-025-10215-2>
- Zambak, V. S., Romagnoli, A., Bazler, J., & Van Sickle, M. L. (2024). Five-week module to introduce interdisciplinary STEAM vision to preservice secondary teachers: A collaborative teacher education approach. In T. Mulvaney, W. O. George, J. Fitzgerald, & W. Morales (Eds.), *Advances in educational marketing, administration, and leadership* (pp. 109–127). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-9904-7.ch007>
- Zorn, I., & Seelmeyer, U. (2017). Inquiry-based learning about technologies in social work education. *Journal of Technology in Human Services*, 35(1), 49–62. <https://doi.org/10.1080/15228835.2017.1277913>

Zulyusri, Z., Santosa, T. A., Festiyed, F., Yerimadesi, Y., Yohandri, Y., Razak, A., & Sofianora, A. (2023). Effectiveness of STEM learning based on design thinking in improving critical thinking skills in science learning: A meta-analysis. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(6), 112–119. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i6.3709>

CRediT Author Statement

Reconhecimentos: Não.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum apoio financeiro.

Conflitos de interesse: Não há conflito de interesse.

Aprovação ética: O trabalho respeitou a ética durante a pesquisa.

Disponibilidade de dados e material: Os dados e materiais utilizados no trabalho não estão disponíveis publicamente para acesso.

Contribuições dos autores: 20% cada autor.

Processamento e editoração: Editora Ibero-Americana de Educação

Revisão, formatação, normalização e tradução

