



Tecnologias Computacionais Assistivas para Estudantes com Deficiência Visual no Aprendizado de Matemática Avançada: um Mapeamento Sistemático da Literatura

Victor Hierro Moraes Ferreira – UFPA/ICEN – victor.hierro@icen.ufpa.br

<https://orcid.org/0000-0003-1481-8324>

Fabíola Pantoja Oliveira Araújo – UFPA/ICEN – fpoliveira@ufpa.br

<https://orcid.org/0000-0002-8485-5799>

Resumo: O ensino de matemática avançada para estudantes cegos e de baixa visão no ensino superior é marcado por barreiras estruturais e cognitivas, dada a natureza visual da disciplina. Este Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL) fundamenta, organiza e discute evidências sobre tecnologias computacionais que apoiam a aprendizagem de cálculo, álgebra e geometria por pessoas com deficiência visual. O MSL adota escopo, critérios de seleção e extração estruturada, e redefine perguntas de pesquisa específicas, que contemplem: representação e audiodescrição de estruturas bidimensionais, autoria matemática por fala, efetividade no aprendizado, compatibilidade com leitores de tela, adaptação pedagógica e lacunas linguísticas, particularmente a ausência de ferramentas computacionais adaptadas para o idioma português brasileiro. Foram consultados os repositórios Scopus, Springer, MDPI e CCSE. Dos 27 estudos inicialmente recuperados, 14 foram lidos na íntegra e 7 atenderam aos critérios de inclusão. A análise contextual do cenário nacional brasileiro complementa a revisão, evidenciando a escassez de soluções computacionais específicas para o ensino de matemática avançada em português. A síntese aponta: (i) lacunas persistentes na representação de estruturas 2D (frações aninhadas, integrais, matrizes) e na escrita matemática por fala em português; (ii) evidências de ganhos de aprendizagem com plataformas interativas adaptativas e camadas de audiodescrição estruturada; e (iii) limitações de compatibilidade e usabilidade em plataformas educacionais amplamente usadas. Os resultados oferecem diretrizes para o desenvolvimento de soluções computacionais efetivas baseadas em um guia de audiodescrição matemática, com ênfase em decomposição passo a passo, feedback adaptativo e suporte à escrita matemática por fala.

Palavras-chave: Ensino de matemática para cegos. Tecnologias assistivas. Educação inclusiva.

Assistive Computational Technologies for Visually Impaired Students in the Learning of Advanced Mathematics: A Systematic Mapping Study

Abstract: Teaching advanced mathematics to blind and low-vision students in higher education presents persistent structural and cognitive challenges due to the inherently visual nature of mathematical notation. This Systematic Mapping Study (SMS) reviews and synthesizes evidence on computational technologies designed to support the learning of calculus, algebra, and geometry by visually impaired learners. The study defines a clear scope, explicit selection criteria, and a structured data extraction protocol, focusing on research questions related to: two-dimensional representation and audio description, speech-based mathematical authoring, learning effectiveness, screen reader compatibility, pedagogical adaptation, and linguistic gaps—particularly the lack of tools localized for Brazilian Portuguese. The repositories Scopus, Springer, MDPI, and CCSE were consulted. Among 27 retrieved records, 14 were reviewed in full and 7 met the inclusion criteria. A contextual analysis of the Brazilian national landscape complements the review, highlighting the scarcity of computational solutions specifically designed for advanced mathematics education in Portuguese. The synthesis identifies



(i) ongoing limitations in 2D structure representation (e.g., nested fractions, integrals, matrices) and speech-based math authoring in Portuguese; (ii) evidence of learning gains through adaptive interactive platforms with structured audio-description layers; and (iii) compatibility and usability issues in mainstream educational systems. The findings inform design guidelines for developing effective computational solutions grounded in a mathematical audio-description framework, emphasizing stepwise decomposition, adaptive feedback, and speech-based input support.

Keywords: Mathematics education for blind. Assistive technologies. Inclusive Education.

1. Introdução

A educação matemática em níveis avançados (cálculo, álgebra, geometria) depende de notações bidimensionais e representações espaciais que, por sua natureza, desafiam a acessibilidade para estudantes cegos e de baixa visão. Mesmo quando acessíveis, muitas soluções se limitam à leitura linear, dificultando a compreensão estrutural de expressões aninhadas, a navegação semântica e a autoria de expressões pelo estudante. Estudos recentes apontam progresso com plataformas interativas que decompõem exercícios em etapas, fornecem pistas (*hints*) e descrevem explicitamente a estrutura das fórmulas para síntese de fala (MAĆKOWSKI *et al.*, 2018; MAĆKOWSKI *et al.*, 2023). Há também ferramentas que automatizam a análise e a resolução de equações (ALI; KHUSRO, 2024) e leitores que tornam audíveis expressões matemáticas complexas (WONGKIA; NARUEDOMKUL; CERCONE, 2012). Persistem, porém, dificuldades de integração com ambientes amplamente utilizados, de padronização das descrições e de suporte à escrita matemática por fala, especialmente em português (MAĆKOWSKI *et al.*, 2018; MAĆKOWSKI *et al.*, 2023).

No cenário internacional, as iniciativas mais citadas incluem: (i) plataformas de tutoria e de aprendizagem multimídia com camada alternativa de descrição e navegação por leitores de tela, ancoradas em decomposição de exercícios e regras de descrição auditiva (MAĆKOWSKI *et al.*, 2018; MAĆKOWSKI; BRZOZA; SPÍŃCZYK, 2017; MAĆKOWSKI *et al.*, 2023); (ii) leitores automáticos de expressões (e.g., i-Math) que convertem fórmulas em áudio, com limitações em estruturas muito complexas (WONGKIA; NARUEDOMKUL; CERCONE, 2012); (iii) solucionadores e analisadores automáticos (e.g., SA-MEAS, baseado em SymPy) que apoiam entendimento passo a passo (ALI; KHUSRO, 2024). Trabalhos de fatores influentes no aprendizado de matemática por pessoas com deficiência visual (SPÍŃCZYK *et al.*, 2019) e estudos de obstáculos contextuais (ALJUNDI; ALTAKHAYNEH, 2020) oferecem o pano de fundo educacional e social para interpretar os efeitos de tais tecnologias.

No contexto nacional brasileiro, não foram encontradas produções que descrevessem tecnologias computacionais assistivas aplicadas ao ensino de matemática avançada para pessoas cegas ou com baixa visão. Entretanto, foram identificados trabalhos que contribuem para compreender o contexto educacional brasileiro e indicar caminhos para o desenvolvimento de soluções que supram essa lacuna, aproximando o cenário local das iniciativas já consolidadas em língua inglesa. Em língua portuguesa, observam-se o uso de *softwares* e recursos informatizados (DIAS; BORGES; SILVEIRA, 2019; MOREIRA *et al.*, 2019), materiais e estratégias pedagógicas adaptadas (SILVA, 2019; ULIANA; LEITE, 2019), além de jogos e recursos lúdicos com potencial inclusivo (MAMCASZ-VIGINHESKI *et al.*, 2019). Embora relevantes, esses esforços não abordam representação auditiva estruturada ou autoria matemática por fala em contextos



de cálculo e álgebra avançada, reforçando as lacunas tecnológicas e pedagógicas que motivaram a realização deste MSL.

Este artigo apresenta um Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL) que mapeia tecnologias, barreiras e evidências de efetividade no ensino de matemática avançada para estudantes com deficiência visual, estabelecendo implicações práticas para o desenvolvimento de soluções computacionais efetivas baseadas em um guia de audiodescrição matemática.

2. Fundamentação Teórica: acessibilidade, audiodescrição e aprendizagem adaptativa

O termo tecnologia assistiva refere-se a recursos e serviços que ampliam autonomia e aprendizagem. Em matemática, há o desafio da dupla codificação simbólica: expressões bidimensionais (frações, potências, radicais, matrizes) precisam ser traduzidas em áudio linear sem perda estrutural. A audiodescrição matemática adota regras com marcadores de escopo (“início/fim”) e nomeação semântica de operadores, mitigando ambiguidade e sobrecarga cognitiva (MAĆKOWSKI *et al.*, 2018). Esta abordagem permite que estudantes compreendam hierarquias e relações entre subexpressões, essenciais para conceitos avançados como limites, derivadas e integrais.

A aprendizagem adaptativa ajusta conteúdo e feedback ao perfil do estudante; em acessibilidade matemática, inclui decomposição em etapas, *hints* e roteamento por grafo de conceitos (MAĆKOWSKI *et al.*, 2023). Sistemas adaptativos mapeiam o conhecimento do aluno através de vetores de erro e conhecimento, permitindo a seleção dinâmica de exercícios e a oferta de explicações alternativas. Esta personalização é particularmente relevante para estudantes com deficiência visual, que podem exigir diferentes níveis de detalhamento na descrição e diferentes ritmos de aprendizagem.

3. Metodologia da Revisão Sistemática

Esta seção apresenta o objetivo e a estrutura metodológica do Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL), conduzido conforme as diretrizes de Kitchenham e Charters (2007). O estudo teve como objetivo identificar, classificar e analisar evidências sobre tecnologias computacionais assistivas aplicadas ao ensino de matemática avançada para estudantes cegos e de baixa visão. O processo metodológico incluiu a definição do escopo, formulação da questão principal (QP) e das questões específicas (QE), seleção das bases de dados, execução das buscas, triagem por título, resumo e texto completo, extração sistemática das informações e síntese dos resultados.

3.1. Questões de pesquisa específicas do MSL

As questões de pesquisa foram formuladas para direcionar a coleta, análise e interpretação das evidências sobre o uso das tecnologias investigadas. A estrutura das questões reflete diferentes dimensões de investigação, desde aspectos técnicos de representação e autoria até critérios pedagógicos, de compatibilidade e contexto linguístico. A Tabela 1 apresenta a questão principal (QP) e as sete questões específicas (QE1–QE7) que guiaram a condução deste Mapeamento Sistemático da Literatura.



Tabela 1. Questão principal e questões específicas de pesquisa do MSL.

Identificador	Questão de Pesquisa
QP	De que forma as tecnologias computacionais assistivas, especialmente aquelas baseadas em representação auditiva e interação adaptativa, têm sido concebidas, aplicadas e avaliadas para apoiar a aprendizagem de matemática avançada por estudantes cegos e de baixa visão no ensino superior?
QE1	Quais estratégias de audiodescrição e navegação são utilizadas para expressões bidimensionais?
QE2	Como as soluções permitem autoria matemática (por teclado ou fala) e que mecanismos de validação são empregados?
QE3	Quais evidências empíricas demonstram ganhos de aprendizagem, engajamento e autonomia?
QE4	Como ocorre a integração com leitores de tela e plataformas de ensino?
QE5	Quais conteúdos e níveis educacionais são abordados nos estudos?
QE6	Que mecanismos de decomposição, roteamento e retroalimentação são implementados?
QE7	Há suporte específico para audiodescrição e fala em português brasileiro?

3.2. Fontes, período e *string* de busca

A busca foi conduzida em bases internacionais revisadas por pares, sendo estas Scopus, SpringerLink (incluindo Multimedia Tools and Applications e Computers in Biology and Medicine), MDPI e CCSE, cobrindo o período de **2012 a 2024**, desde o estudo pioneiro *i-Math* (WONGKIA; NARUEDOMKUL; CERCONE, 2012) até métodos adaptativos recentes (MAĆKOWSKI *et al.*, 2023). A Tabela 2 resume a *string* de busca empregada, estruturada com operadores booleanos para combinar termos de tecnologia, matemática e deficiência visual.

Tabela 2. *String* de busca utilizada no MSL (formato reduzido).

("Technology"OR "Assistive Technology"OR "Digital Tools"OR "Educational Technology"OR "ICT"OR "Information and Communication Technology"OR "Information Technology"OR "Innovative Technology"OR "Computer-Based System"OR "Digital Resources"OR "Virtual Reality"OR "E-learning Tools"OR "Technological Tools"OR "Games"OR "Digital Accessibility"OR "Accessible Technology"OR "Educational Platforms"OR "Tutoring Platforms") AND ("Mathematical Ability"OR "Math Skill"OR "Learning Mathematics"OR "Math Learning"OR "Mathematics Education"OR "Numeracy"OR "Basic Arithmetic"OR "Math Understanding"OR "Mathematical Reasoning"OR "Development of Mathematical Abilities"OR "STEM Education"OR "Interactive Learning"OR "Math Tutoring"OR "Accessible Learning"OR "Mathematical Platforms"OR "Mathematics for Blind Students"OR "Teaching Mathematics to Blind People"OR "Learning Adaptations"OR "Feedback in Learning"OR "Personalized Learning Path") AND ("Visually Impaired"OR "Blind"OR "Low Vision"OR "Vision Impairment"OR "Sight Impairment"OR "Visual Disability"OR "Partially Sighted"OR "Un sighted"OR "Students with Visual Impairments"OR "Learners with Visual Impairments"OR "Accessible for Blind"OR "Accessible for Visually Impaired"OR "Mathematics Teaching for Blind Students"OR "Feedback Process in Education")

3.3. Critérios de inclusão e exclusão

O processo de seleção, triagem e classificação dos estudos foi conduzido na plataforma *Parsifal*®¹, ferramenta online voltada ao apoio de Revisões e Mapeamentos Sistemáticos da Literatura. Todas as etapas foram registradas e acompanhadas de forma colaborativa em uma planilha disponível no *Google Drive*², garantindo rastreabilidade e transparência do processo.

¹ (<https://parsif.al/>)

² (https://docs.google.com/spreadsheets/d/e/2PACX-1vQ2fqVRAAtE9gcvmImZsV_KgYL_cwwPK1E4ExMEfJsAQFmKY6Rck291qQwxBZawolA/pubhtml)



A Tabela 3 apresenta os critérios de **inclusão** e **exclusão** aplicados na triagem. Os critérios de inclusão priorizaram estudos com foco explícito em tecnologias computacionais assistivas voltadas ao ensino de matemática para pessoas com deficiência visual, com descrição técnica e/ou avaliação empírica disponíveis integralmente. Por outro lado, os critérios de exclusão eliminaram trabalhos fora do escopo, sem validação prática, duplicados ou sem revisão por pares.

Tabela 3. Critérios de inclusão e exclusão adotados no MSL.

Tipo de critério	Descrição resumida
Inclusão	Tecnologias computacionais assistivas aplicadas à aprendizagem de matemática por pessoas com deficiência visual; descrição técnica e/ou avaliação empírica; idioma inglês; revisão por pares; texto completo disponível.
Exclusão	Trabalhos fora do escopo (sem foco em matemática, deficiência visual ou tecnologia); não revisados por pares; apenas conceituais ou sem aplicação prática; fora do período (2012–2024); duplicatas ou versões preliminares.

3.4. Processo de seleção e resultados da busca

Após a aplicação dos critérios apresentados na Tabela 3, o processo de busca resultou em 27 registros iniciais. Após a triagem por título e resumo, 14 estudos foram lidos integralmente, dos quais 7 atenderam plenamente aos critérios de inclusão e compuseram o conjunto final do MSL.

A distribuição dos estudos por repositório, detalhada na Tabela 4, mostra a predominância de publicações provenientes das bases Scopus e Springer, ambas com três estudos incluídos. As bases MDPI e CCSE contribuíram com menor representatividade quantitativa, mas complementaram a diversidade metodológica dos achados.

Tabela 4. Repositórios e contagem de estudos ao longo do funil de seleção.

Repositório	Recuperados	Lidos na íntegra	Incluídos
Scopus	16	7	3
Springer	7	5	3
MDPI	3	1	1
CCSE (IES)	1	1	0
Total	27	14	7

4. Panorama dos estudos incluídos

A Tabela 5 apresenta uma síntese dos estudos incluídos no Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL), organizados em ordem cronológica (2012–2024). Esses trabalhos representam o núcleo das evidências empíricas e técnicas sobre o uso de tecnologias computacionais assistivas voltadas ao ensino e à aprendizagem de matemática para pessoas com deficiência visual. Observa-se uma evolução progressiva nas abordagens, que se inicia com leitores automáticos de expressões matemáticas e avança para plataformas interativas e sistemas adaptativos com feedback inteligente. Cada estudo contribui de forma distinta para a compreensão dos mecanismos de acessibilidade, usabilidade e efetividade no aprendizado de matemática avançada, permitindo identificar lacunas e tendências de desenvolvimento tecnológico que orientam as discussões



subsequentes deste trabalho. Para fins de referência e consistência terminológica ao longo do texto, cada estudo incluído foi identificado por uma sigla única na forma [EP1] a [EP7] (Estudo Primário), conforme apresentado na Tabela 5. Essa nomenclatura será utilizada em todas as seções seguintes para facilitar a rastreabilidade das análises, sínteses e discussões associadas a cada publicação.

Tabela 5. Síntese dos estudos incluídos no MSL.

Estudo Primário (EP)	Ano	Base	Contribuições centrais
EP1 – i-Math (WONGKIA; NARUEDOMKUL; CERCONE, 2012)	2012	Scopus	Leitor automático de expressões para estudantes cegos; conversão de fórmulas em áudio e prática autônoma; limitações em expressões altamente complexas e aninhadas.
EP2 – Tutoring math platform (MAĆKOWSKI; BRZOZA; SPIŃCZYK, 2017)	2017	Springer (CBM)	Tutoria interativa baseada em <i>state machine</i> , <i>hints</i> , análise de erro e acompanhamento docente; integração com tecnologias assistivas; foco em acessibilidade.
EP3 – Multimedia platform (MAĆKOWSKI <i>et al.</i> , 2018)	2018	Springer (MTA)	Plataforma web com exercícios decompostos; regras de audiodescrição com marcadores de escopo; navegação semântica; avaliação com cegos/baixa visão mostra boa compreensão de estruturas 2D com leitores de tela.
EP4 – Fatores de aprendizagem (SPIŃCZYK <i>et al.</i> , 2019)	2019	Springer (CBM)	Fatores que influenciam a aprendizagem (motivação, incerteza, consolidação de habilidades) e necessidades de mediação acessível; destaca papel de feedback estruturado.
EP5 – Obstáculos contextuais (ALJUNDI; ALTAKHAYNEH, 2020)	2020	CCSE (IES)	Obstáculos contextuais em matemática para cegos (materiais, métodos e acessibilidade de recursos) em escolas da Jordânia; implicações para desenho de soluções inclusivas.
EP6 – Methods and Tools (MAĆKOWSKI <i>et al.</i> , 2023)	2023	MDPI (Applied Sciences)	Modelo centrado no usuário com grafo de conceitos e vetores de conhecimento/erro; seleção adaptativa de exercícios; melhora média de 14% no teste final; discussão sobre lacunas de acessibilidade em plataformas populares.
EP7 – SA-MEAS (ALI; KHUSRO, 2024)	2024	Springer/Elsevier	Sistema baseado em SymPy para análise/solução de equações; potencial para reduzir carga cognitiva via decomposição e feedback automático; aplicável como backend de validação.



5. Resultados por Questão de Pesquisa

Esta seção apresenta os resultados do Mapeamento Sistemático da Literatura organizados de acordo com as sete questões específicas de pesquisa (QE1 a QE7). Para cada questão, sintetizam-se as principais evidências encontradas nos estudos incluídos (EP1 a EP7), oferecendo uma visão estruturada do estado da arte.

5.1. QE1 – Estratégias de audiodescrição e navegação para expressões bidimensionais

Os estudos incluídos evidenciam que as soluções mais eficazes adotam regras formais de audiodescrição com marcadores de escopo explícitos (e.g., "início/fim") e permitem navegação hierárquica por subexpressões [EP3]. O leitor automático i-Math [EP1] demonstra potencial para conversão de fórmulas em áudio, mas apresenta limitações em estruturas altamente aninhadas. Nenhuma das ferramentas analisadas oferece suporte nativo ao português brasileiro.

5.2. QE2 – Autoria matemática e mecanismos de validação

A autoria matemática acessível permanece como um desafio significativo. As soluções revisadas priorizam interfaces de teclado com suporte a leitores de tela [EP3], [EP6]. Apenas um estudo recente [EP7] integra reconhecimento de fala a motores simbólicos (SymPy) para validação de expressões ditadas, representando um avanço conceitual ainda não adaptado ao contexto linguístico brasileiro.

5.3. QE3 – Evidências empíricas de ganhos de aprendizagem, engajamento e autonomia

Evidências quantitativas indicam ganhos de aprendizagem (até 14% em avaliações pós-teste) com o uso de plataformas adaptativas [EP6]. Estudos qualitativos relatam redução de incerteza e maior engajamento quando há decomposição de problemas e feedback formativo [EP4]. Contudo, persiste escassez de estudos com amostras amplas e desenhos metodológicos robustos.

5.4. QE4 – Integração com leitores de tela e plataformas de ensino

Identificam-se inconsistências na compatibilidade entre leitores de tela (JAWS, NVDA, SuperNova) e navegadores, especialmente na interpretação de MathML e $\text{\LaTeX}$ [EP3], [EP6]. Soluções que implementam camadas textuais alternativas demonstram melhor interoperabilidade, mas a padronização técnica permanece limitada.

5.5. QE5 – Conteúdos e níveis educacionais abordados

Os estudos concentram-se predominantemente em cálculo diferencial/integral e álgebra elementar/intermediária [EP2], [EP3], [EP6]. Há lacunas significativas na cobertura de geometria analítica, estatística e álgebra linear avançada, indicando limitações no escopo das tecnologias assistivas atuais.

5.6. QE6 – Mecanismos de decomposição, roteamento e retroalimentação

Mecanismos baseados em grafos de conceitos e vetores de conhecimento/erro sustentam a adaptação pedagógica em plataformas mais avançadas [EP6]. A integração com motores simbólicos permite validação incremental de expressões [EP7], demonstrando potencial para reduzir carga cognitiva e personalizar trajetórias de aprendizagem.



5.7. QE7 – Suporte para audiodescrição e fala em português brasileiro

Todos os estudos incluídos são em língua inglesa e não oferecem suporte específico ao português brasileiro. Esta lacuna linguística configura uma barreira significativa para a adoção e efetividade dessas tecnologias no contexto educacional nacional.

6. Discussão

A seção de discussão interpreta criticamente os resultados apresentados, estabelecendo conexões entre os achados empíricos e as implicações teóricas e práticas para o campo. A análise está organizada em torno das sete questões de pesquisa, permitindo uma reflexão aprofundada sobre padrões, tendências e desafios emergentes.

Discussão da Questão Principal (QP)

Os resultados evidenciam uma transição paradigmática no desenho de tecnologias assistivas para matemática: de abordagens centradas na tradução linear da notação visual para modelos baseados em estrutura semântica, interação ativa e aprendizagem adaptativa. Esta evolução, embora promissora, ainda se concentra em um número limitado de iniciativas e domínios matemáticos, com escassa penetração em contextos educacionais reais de ensino superior. A consolidação dessas abordagens como prática pedagógica ampla requer superar barreiras técnicas, promover padronização e desenvolver evidências empíricas mais robustas.

QE1 – Representação auditiva de estruturas bidimensionais

O consenso emergente sobre a necessidade de audiodescrição estruturada com marcadores de escopo representa um avanço significativo. Contudo, a aplicação não uniforme dessas convenções entre diferentes ferramentas [EP1], [EP3] limita a interoperabilidade e força os usuários a reaprender convenções específicas. A ausência de guias padronizados de audiodescrição matemática configura uma barreira sistêmica que demanda esforços coordenados de padronização, particularmente no contexto do português brasileiro.

QE2 – Autoria matemática

A discrepância entre avanços na leitura acessível e limitações na autoria matemática revela uma assimetria crítica no ecossistema de tecnologias assistivas. Interfaces baseadas em teclado, embora funcionais, impõem barreiras de usabilidade para usuários de leitores de tela [EP3], [EP6]. A integração emergente entre reconhecimento de fala e validação simbólica [EP7] aponta uma direção promissora, mas carece de maturidade tecnológica e, fundamentalmente, de adaptação linguística ao português brasileiro.

QE3 – Efetividade pedagógica

As evidências de ganhos de aprendizagem com abordagens adaptativas [EP4], [EP6] reforçam o valor pedagógico da decomposição explícita de problemas e do feedback formativo em contextos de aprendizagem sem pistas visuais. No entanto, a heterogeneidade metodológica nos estudos existentes, com amostras reduzidas e métricas diversas, limita a generalização dos achados e sublinha a necessidade urgente de protocolos padronizados de avaliação e estudos longitudinais em ambientes educacionais autênticos.



QE4 – Compatibilidade e interoperabilidade

A inconsistência no comportamento de padrões como MathML e $\text{\LaTeX}$ entre diferentes leitores de tela e navegadores [EP3], [EP6] revela uma fragilidade técnica persistente no ecossistema de acessibilidade. Esta barreira de interoperabilidade não apenas limita a adoção de soluções existentes, mas também desincentiva o desenvolvimento de novas ferramentas. A implementação sistemática de camadas textuais alternativas e a promoção de padrões abertos e testáveis emergem como diretrizes técnicas prioritárias.

QE5 – Cobertura de conteúdos matemáticos

A concentração das pesquisas em cálculo e álgebra elementar [EP2], [EP3], [EP6] reflete tanto a complexidade técnica da representação acessível de domínios matemáticos avançados quanto uma possível lacuna na articulação entre especialistas em matemática, educação e acessibilidade. A ampliação do escopo de conteúdos exige não apenas inovação tecnológica, mas também colaboração interdisciplinar mais intensa e sistemática.

QE6 – Adaptação, decomposição e feedback

Os mecanismos adaptativos baseados em grafos de conceitos e validação simbólica [EP6], [EP7] demonstram potencial significativo para personalizar trajetórias de aprendizagem e reduzir carga cognitiva. Contudo, o fosso entre prototipagem e implementação em escala real limita a validação prática dessas abordagens. A translação efetiva para ambientes educacionais reais requer atenção simultânea às dimensões técnica, pedagógica e institucional.

QE7 – Suporte linguístico e contexto brasileiro

A completa ausência de suporte ao português brasileiro nas tecnologias analisadas configura não apenas uma barreira linguística, mas uma lacuna de inclusão digital com implicações educacionais profundas. No contexto do ensino superior brasileiro, onde a fluência em inglês não pode ser presumida, esta limitação inviabiliza a adoção de soluções internacionais. A localização linguística de ferramentas existentes e, especialmente, o desenvolvimento de soluções concebidas para o contexto educacional brasileiro emergem como imperativos éticos e pedagógicos.

Síntese Integrada das Barreiras e Diretrizes

A análise integrada permite identificar barreiras sistêmicas que transcendem dimensões técnicas isoladas. A Tabela 6 sintetiza estas barreiras e as respectivas diretrizes para pesquisa e desenvolvimento futuro.

Tabela 6. Síntese integrada das barreiras e diretrizes identificadas.

Dimensão	Barreira identificada	Diretrizes futuras
Representação auditiva	Ausência de padrões para audiodescrição de estruturas 2D; baixa interoperabilidade.	Desenvolver guias de audiodescrição matemática em português; padronizar convenções baseadas em marcadores de escopo.



Dimensão	Barreira identificada	Diretrizes futuras
Autoria matemática	Escassez de escrita por fala com validação semântica em português; interfaces complexas.	Integrar reconhecimento de fala com validação simbólica; criar interfaces <i>audio-first</i> em português.
Avaliação pedagógica	Heterogeneidade metodológica; estudos com amostras reduzidas e curta duração.	Estabelecer protocolos padronizados de avaliação; realizar estudos longitudinais em contextos reais.
Compatibilidade técnica	Inconsistência entre leitores de tela, navegadores e padrões matemáticos.	Implementar camadas textuais alternativas robustas; promover padrões abertos e testáveis.
Cobertura de conteúdos	Concentração em cálculo/álgebra; lacunas em geometria, estatística e álgebra linear.	Ampliar escopo para conteúdos avançados; fomentar colaboração interdisciplinar.
Mecanismos adaptativos	Protótipos não escalados; validação limitada em contextos reais.	Focar na implementação em ambientes educacionais reais; testar em contextos autênticos.
Localização linguística	Falta de suporte ao português brasileiro; barreiras de compreensão.	Localizar linguisticamente ferramentas existentes; desenvolver soluções para o contexto brasileiro.

7. Conclusões e trabalhos futuros

Este Mapeamento Sistemático da Literatura evidenciou que tecnologias computacionais baseadas em audiodescrição estruturada, decomposição de problemas, feedback adaptativo e mecanismos de personalização sustentam ganhos de aprendizagem e promovem compreensão conceitual em estudantes cegos e de baixa visão. Os sete estudos incluídos (EP1 a EP7) demonstram uma evolução promissora: de abordagens centradas na tradução linear para modelos baseados em estrutura semântica e interação adaptativa. Contudo, persistem lacunas críticas, especialmente na autoria matemática por fala em português brasileiro, na representação acessível de estruturas bidimensionais complexas e na compatibilidade técnica com ambientes educacionais amplamente utilizados.

A análise contextual do cenário nacional brasileiro, apresentada na Introdução, revela uma disparidade significativa: enquanto iniciativas internacionais avançam no desenvolvimento de soluções computacionais sofisticadas, o contexto nacional ainda carece de tecnologias assistivas específicas para o ensino de matemática avançada em língua portuguesa. Esta lacuna não apenas limita o acesso de estudantes brasileiros a recursos educacionais adequados, mas também evidencia a necessidade de desenvolvimento tecnológico localmente contextualizado.

Como diretrizes para trabalhos futuros, destacam-se quatro eixos prioritários:

(i) Padronização da audiodescrição matemática em português brasileiro: Desenvolver guias de audiodescrição matemática contextualizados cultural e linguisticamente, estabelecendo convenções padronizadas para leitura de expressões bidimensionais complexas. Esta padronização deve considerar especificidades da terminologia matemática brasileira e das convenções pedagógicas locais.

(ii) Integração de reconhecimento de fala e validação simbólica: Criar sistemas que permitam autoria matemática por voz em português brasileiro, integrando



mecanismos de reconhecimento de fala com validação sintática e semântica baseada em motores simbólicos. Tais sistemas devem oferecer feedback imediato e corretivo, reduzindo a dependência de interfaces visuais complexas.

(iii) Personalização baseada em modelagem do conhecimento: Implementar mecanismos adaptativos que utilizem vetores de conhecimento e erro para personalizar trajetórias de aprendizagem, ajustando o nível de detalhamento das descrições, a complexidade dos exercícios e o tipo de feedback conforme o perfil individual do estudante.

(iv) Validação em contextos educacionais reais: Desenvolver e avaliar protótipos *audio-first* em ambientes autênticos de ensino superior brasileiro, utilizando métodos mistos (métricas de usabilidade como SUS, avaliações de desempenho e entrevistas qualitativas) para mensurar impacto pedagógico, acessibilidade e aceitação por parte de estudantes e docentes.

Estas direções delineiam um programa de pesquisa e desenvolvimento que busca não apenas transferir tecnologias internacionais, mas criar soluções computacionais efetivas concebidas desde sua origem para o contexto educacional brasileiro. A superação das barreiras identificadas exigirá colaboração interdisciplinar entre pesquisadores em computação, educação, matemática e acessibilidade, além do envolvimento direto de estudantes com deficiência visual em todas as etapas do processo de design e avaliação. O avanço neste campo representa não apenas um desafio técnico, mas um compromisso com a equidade educacional e a inclusão efetiva no ensino superior brasileiro.

Referências

- ALI, A.; KHUSRO, S. Sa-meas: Sympy-based automated mathematical equations analysis and solver. **SoftwareX**, Elsevier, v. 25, p. 101596, 2024.
- ALJUNDI, K.; ALTAKHAYNEH, B. Obstacles to blind students' learning maths in Jordan from students' and teachers' perspectives. **International Education Studies**, Canadian Center of Science and Education, v. 13, n. 8, p. 1–5, 2020.
- DIAS, A.; BORGES, J.; SILVEIRA, J. Técnica de ensino de matemática para alunos com deficiência visual com suporte informatizado. In: **Minicursos da ERSI-RJ 2019 - VI Escola Regional de Sistemas de Informação do Rio de Janeiro**. [S.l.: s.n.], 2019.
- KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**. UK, 2007. Disponível em: https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf.
- MAMCASZ-VIGINHESKI, L.; SILVA, S.; SHIMAZAKI, E.; PINHEIRO, N. Jogos na alfabetização matemática para estudantes com deficiência visual numa perspectiva inclusiva. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, v. 14, n. 2, p. 889–903, 2019.
- MAĆKOWSKI, M.; BRZOZA, P.; SPIŃCZYK, D. Tutoring math platform accessible for visually impaired people. **Computers in Biology and Medicine**, Elsevier, v. 95, p. 298–306, 2017.
- MAĆKOWSKI, M.; BRZOZA, P.; ŻABKA, M.; SPIŃCZYK, D. Multimedia platform for mathematics' interactive learning accessible to blind people. **Multimedia Tools and Applications**, Springer, v. 77, n. 5, p. 6191–6208, 2018.
- MAĆKOWSKI, M.; KAWULOK, M.; BRZOZA, P.; SPIŃCZYK, D. Methods and tools supporting the learning and teaching of mathematics dedicated to students with blindness. **Applied Sciences**, MDPI, v. 13, n. 12, p. 7240, 2023.



MOREIRA, I. D. L. *et al.* Vamos jogar matemática: utilizando o rpg maker para produzir um recurso educacional digital para o ensino de matemática. In: **Anais do Congresso de Tecnologias na Educação (CTRL+E)**. [S.l.: s.n.], 2019.

SILVA, J. A utilização de materiais didáticos como recurso facilitador no processo de ensino e aprendizagem da matemática para alunos com deficiência visual. **Revista Brasileira de Educação Matemática Inclusiva**, 2019.

SPIŃCZYK, D.; MAĆKOWSKI, M.; BRZOZA, P. *et al.* Factors influencing the process of learning mathematics among visually impaired and blind people. **Computers in Biology and Medicine**, Elsevier, v. 104, p. 1–9, 2019.

ULIANA, M.; LEITE, E. Educação inclusiva no curso de extensão universitária: estratégias, recursos e materiais didáticos no ensino de matemática para estudantes da educação básica com deficiência visual. **Revista Educação Matemática Debate**, v. 1, p. 297–311, 2019.

WONGKIA, W.; NARUEDOMKUL, K.; CERCONE, N. i-math: Automatic math reader for thai blind and visually impaired students. **Computers & Mathematics with Applications**, Elsevier, v. 64, n. 6, p. 2128–2140, 2012.