

**UM FRAMEWORK PARA A FORMAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS:
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, COMPETÊNCIAS PARA
A SUSTENTABILIDADE E EDUCAÇÃO PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

<https://seer.ufs.br/index.php/geonordeste>
ISSN: 2318-2695

Recebido em 28 de Maio de 2026
Aprovado em 16 de Junho de 2026

**A FRAMEWORK FOR INTERDISCIPLINARY TRAINING IN
ENVIRONMENTAL SCIENCES:
ARTIFICIAL INTELLIGENCE, SUSTAINABILITY
COMPETENCIES AND EDUCATION FOR SUSTAINABLE
DEVELOPMENT**

**UN FRAMEWORK PARA LA FORMACIÓN
INTERDISCIPLINARIA EN CIENCIAS AMBIENTALES:
INTELIGENCIA ARTIFICIAL, COMPETENCIAS PARA LA
SOSTENIBILIDAD Y EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DOI 10.33360/geonordeste.v37i.25202

Siderly do Carmo Dahle de Almeida

Doutora, Universidade Estadual do Norte do Paraná
siderly.c@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2190-7213>

Patricia Margarida Farias Coelho

Doutora, Universidade Brasil
patriciafariascoelho@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1662-1173>

Marcia Fernandes de Oliveira

Doutora, Must University
profamfoliveira@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9755-0612>

RESUMO

A crescente complexidade dos desafios socioambientais municipais no Brasil evidencia a insuficiência das formas tradicionais de formação em Ciências Ambientais. Simultaneamente, a inteligência artificial (IA) emerge como mediação tecnológica capaz de reconfigurar os processos formativos na pós-graduação. Este artigo, de natureza teórico-conceitual, propõe um framework articulador entre competências para a sustentabilidade, formação interdisciplinar em Ciências Ambientais e potencialidades pedagógicas da IA. O framework organiza-se em três camadas interdependentes — epistemológica, formativa e instrumental —, orientadas pelos princípios da Educação para o Desenvolvimento Sustentável, pelo referencial de competências proposto por Wiek et al. (2011) e refinado por Brundiers et al. (2021), Duda (2026), Schünke et al. (2026), Da Silva (2026) e Cardoso, Novaes e Zumkeller (2025), e pelas diferentes modalidades de aplicação da IA no campo ambiental e pedagógico. Argumenta-se que a incorporação da IA deve ser orientada por uma racionalidade que subordine o uso tecnológico aos objetivos formativos e aos compromissos éticos do campo, recusando tanto o entusiasmo acrítico quanto a rejeição apriorística. Os resultados oferecem subsídios para programas comprometidos com a formação de profissionais aptos a enfrentar os desafios socioambientais em escala municipal.

Palavras-chave: Ciências Ambientais. Inteligência Artificial. Competências para a Sustentabilidade. Educação para o Desenvolvimento Sustentável. Gestão Ambiental.

ABSTRACT

The growing complexity of municipal socio-environmental challenges in Brazil highlights the insufficiency of traditional approaches to professional training in Environmental Sciences. At the same time, artificial



intelligence (AI) emerges as a technological mediation with the potential to reconfigure formative processes in graduate programs. This theoretical-conceptual essay proposes an articulating framework between sustainability competencies, interdisciplinary training in Environmental Sciences, and the pedagogical potentialities of AI. The framework is organized into three interdependent layers — epistemological, formative, and instrumental — guided by the principles of Education for Sustainable Development, by the sustainability competencies framework proposed by Wiek et al. (2011) and refined by Brundiers et al. (2021), Duda (2026), Schünke et al. (2026), Da Silva (2026), and Cardoso, Novaes, and Zumkeller (2025), and by the different modalities of AI application in environmental and pedagogical fields. The article argues that AI incorporation must be guided by a rationality that subordinates technological use to formative objectives and the field's ethical commitments, rejecting both uncritical enthusiasm and a priori refusal. The findings provide theoretical foundations for programs committed to training professionals capable of addressing socio-environmental challenges at the municipal scale.

Keywords: Environmental Sciences. Artificial Intelligence. Sustainability Competencies. Education for Sustainable Development. Environmental Management

RESUMEN

La creciente complejidad de los desafíos socioambientales municipales en Brasil evidencia la insuficiencia de las formas tradicionales de formación en Ciencias Ambientales. Al mismo tiempo, la inteligencia artificial (IA) emerge como mediación tecnológica capaz de reconfigurar los procesos formativos en el posgrado. Este artículo teórico-conceptual propone un framework articulador entre competencias para la sostenibilidad, formación interdisciplinaria en Ciencias Ambientales y potencialidades pedagógicas de la IA. El framework se organiza en tres capas interdependientes — epistemológica, formativa e instrumental —, orientadas por los principios de la Educación para el Desarrollo Sostenible, por el referencial de competencias propuesto por Wiek et al. (2011) y refinado por Brundiers et al. (2021), Duda (2026), Schünke et al. (2026), Da Silva (2026) y Cardoso, Novaes y Zumkeller (2025), y por las diferentes modalidades de aplicación de la IA en el campo ambiental y pedagógico. Se argumenta que la incorporación de la IA debe estar orientada por una racionalidad que subordine el uso tecnológico a los objetivos formativos y a los compromisos éticos del campo, rechazando tanto el entusiasmo acrítico como el rechazo apriorístico. Los resultados ofrecen fundamentos para programas comprometidos con la formación de profesionales capaces de enfrentar los desafíos socioambientales a escala municipal.

Palabras Clave: Ciencias Ambientales. Inteligencia Artificial. Competencias para la Sostenibilidad. Educación para el Desarrollo Sostenible. Gestión Ambiental.

1.INTRODUÇÃO

Os desafios socioambientais contemporâneos têm revelado os limites das formas tradicionais de produção de conhecimento e de formação profissional (Cardoso, Novaes, Sabonaro, 2026). A degradação dos ecossistemas, a intensificação das mudanças climáticas, a desigualdade no acesso a recursos naturais e os impactos sobre a saúde das populações urbanas e rurais configuram problemas de natureza complexa, que resistem a abordagens disciplinares isoladas e demandam respostas integradas, territorialmente situadas e socialmente comprometidas (Leff, 2011; Morin, 2000). nesse cenário, a formação de profissionais capazes de atuar na gestão ambiental municipal emerge como uma necessidade estratégica, especialmente em países como o Brasil, onde os municípios concentram responsabilidades significativas na implementação de políticas ambientais e no enfrentamento de vulnerabilidades socioecológicas.

A magnitude desse desafio ganha contornos concretos quando se observa a realidade institucional dos municípios brasileiros (Da Silva, 2025). Dados da Pesquisa de Informações Básicas Municipais do IBGE (IBGE, 2022) revelam que parcela expressiva dos municípios



brasileiros ainda carece de estruturas mínimas de gestão ambiental — como conselhos municipais de meio ambiente ativos, fundos específicos e quadros técnicos qualificados —, situação que se agrava nos municípios de pequeno porte, onde vivem aproximadamente 30% da população brasileira. A fragilidade institucional da gestão ambiental municipal não é, contudo, apenas um problema de recursos financeiros ou de infraestrutura — é, fundamentalmente, um problema de formação. De acordo com Da Silva (2025) a ausência de profissionais capazes de articular conhecimentos técnicos, competências analíticas e habilidades de gestão em contextos marcados pela complexidade socioambiental representa um gargalo estrutural que os programas de pós-graduação em Ciências Ambientais têm a responsabilidade de enfrentar. É nesse sentido que a formação interdisciplinar orientada à sustentabilidade não é um horizonte abstrato, mas uma resposta concreta a uma demanda institucional verificável (Schünke et al 2026).

Ao mesmo tempo, a inteligência artificial (IA) tem se consolidado como uma das forças tecnológicas de maior impacto sobre os modos de produzir conhecimento, de tomar decisões e de organizar processos formativos. Na área ambiental, ferramentas baseadas em IA já são empregadas no monitoramento de ecossistemas, na modelagem de cenários climáticos, na análise de dados geoespaciais e na identificação de padrões em fenômenos socioambientais de alta complexidade (Rolnick et al., 2022; Leal Filho et al., 2023). No campo educacional, suas potencialidades para a personalização da aprendizagem, o apoio à pesquisa e o desenvolvimento de novas metodologias têm sido objeto de crescente interesse, ainda que acompanhadas de questionamentos legítimos sobre seus usos, limites e implicações éticas (Selwyn, 2019; Zawacki-Richter et al., 2019).

A convergência entre esses dois movimentos — a urgência de uma formação ambiental interdisciplinar e a emergência da IA como mediação tecnológica — coloca questões relevantes para os programas de pós-graduação em Ciências Ambientais. Como a IA pode contribuir para o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade? De que modo ferramentas de inteligência artificial podem potencializar práticas de pesquisa, desenvolvimento e inovação orientadas à gestão ambiental integrada? E, sobretudo, como articular esses elementos em um referencial formativo coerente com os princípios da interdisciplinaridade e da Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS)?

Essas questões, embora relevantes, permanecem pouco exploradas na literatura especializada. Revisões da produção científica recente nas bases *Scopus* e *Web of Science* indicam que, embora a IA na educação ambiental e as competências para a sustentabilidade sejam temas com produção crescente quando tomados separadamente, sua articulação sistemática — especialmente no contexto da pós-graduação e da gestão ambiental municipal em países do Sul Global — ainda constitui uma lacuna significativa (Brundiers et al., 2021; Zawacki-Richter et al., 2019). No contexto brasileiro e latino-americano, essa lacuna é ainda mais pronunciada, o que



confere ao presente artigo uma contribuição de originalidade tanto teórica quanto contextual. Evidenciam, ainda, que o agrava esse cenário o despreparo de parte dos docentes e formadores para lidar com a integração crítica das tecnologias de inteligência artificial nos processos pedagógicos, realidade que se aprofunda à medida que essas tecnologias se tornam cada vez mais presentes na vida acadêmica e profissional. A justificativa para este ensaio reside, assim, tanto na relevância crescente do tema quanto na escassez de referenciais teóricos que orientem, de forma articulada e criticamente fundamentada, a incorporação da IA na formação em Ciências Ambientais.

É a partir deste panorama, dessas questões e do reconhecimento dessa lacuna que o presente artigo se organiza para compreender o objetivo de sugerir um framework que conecte competências para (i) a sustentabilidade, (ii) a formação interdisciplinar em Ciências Ambientais e (iii) as potencialidades pedagógicas da inteligência artificial. Dessa maneira, o framework organiza-se em três camadas interdependentes — epistemológica, formativa e instrumental —, orientadas, respectivamente, pelos princípios da Educação para o Desenvolvimento Sustentável e da interdisciplinaridade (RODRIGUES, 2024). Trata-se de um ensaio teórico-conceitual que tem por objetivo propor um framework articulador entre as competências para a sustentabilidade, a formação interdisciplinar em Ciências Ambientais e as potencialidades pedagógicas da inteligência artificial.

Para tanto, o texto percorre três movimentos complementares: primeiro, revisita o referencial das competências para a sustentabilidade, com ênfase principalmente nas contribuições de Cardoso, Novaes, Sabonaro, (2026), Malta et al. (2025), Duda (2025), Gonsales (2022), Wiek et al. (2011) e Brundiers et al. (2021); segundo, situa a EDS e a interdisciplinaridade como horizontes orientadores da formação ambiental; terceiro, analisa criticamente as contribuições da IA para a formação e para a PD&I em Ciências Ambientais. A síntese desses movimentos é apresentada na forma de um framework conceitual que busca oferecer subsídios teóricos para programas de pós-graduação comprometidos com a formação de profissionais capazes de enfrentar os desafios socioambientais do nosso tempo.

2. COMPETÊNCIAS PARA A SUSTENTABILIDADE: REFERENCIAL PARA A FORMAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

A noção de competência ocupa lugar central nos debates contemporâneos sobre formação profissional e educação superior, embora sua apropriação teórica seja atravessada por tensões que merecem reconhecimento. Em sentido amplo, competências não se reduzem a habilidades técnicas ou desempenhos mensuráveis, mas envolvem a capacidade de mobilizar conhecimentos, valores e disposições para agir de forma reflexiva e responsável diante de situações complexas (Perrenoud,



1999; Le Boterf, 2003). No campo da sustentabilidade, essa perspectiva ganha densidade específica, uma vez que os problemas socioambientais não admitem soluções algorítmicas nem respostas previamente codificadas — exigem, ao contrário, julgamento situado, pensamento sistêmico e comprometimento ético com as gerações presentes e futuras (Schünke et al. 2026).

Foi a partir deste contexto que Wiek et al. (2011) propuseram um quadro referencial de competências-chave para a sustentabilidade, amplamente adotado em programas de formação em nível internacional. Os autores identificaram cinco competências centrais, a saber: (i) a competência de pensamento sistêmico, que envolve a capacidade de analisar sistemas socioecológicos em sua complexidade, identificando interações, interdependências e dinâmicas não lineares; (ii) a competência antecipatória, que diz respeito à habilidade de construir, avaliar e transformar cenários futuros, mobilizando imagens de sustentabilidade como orientadoras da ação presente; (iii) a competência normativa, entendida como a capacidade de mapear, especificar e negociar visões de sustentabilidade a partir de princípios de justiça, equidade e responsabilidade; (iv) a competência estratégica, que se refere à capacidade de desenhar e implementar intervenções, transições e estratégias transformadoras; e (iv) a competência interpessoal, que abrange habilidades de colaboração, comunicação e mediação de conflitos em contextos marcados pela diversidade de saberes e interesses.

Em revisão posterior, Brundiers et al. (2021) propuseram refinamentos a esse quadro, incorporando a competência de implementação — isto é, a capacidade de colocar em prática as soluções concebidas, considerando as condições institucionais, políticas e culturais dos contextos de atuação — e destacando a importância de integrar as competências de forma relacional, e não como atributos isolados. Essa perspectiva relacional é particularmente relevante para programas de pós-graduação em Ciências Ambientais, nos quais a formação não pode se restringir ao domínio de conteúdos disciplinares, mas deve cultivar disposições intelectuais e práticas orientadas à transformação socioambiental (Malta et al. 2025).

Segundo Loureiro (2012), a formação ambiental em nível de pós-graduação deve superar a lógica da especialização fragmentada, cultivando uma racionalidade integradora capaz de articular saberes disciplinares em função de problemas socioambientais concretos — perspectiva que encontra plena ressonância no referencial de competências proposto por Wiek et al. (2011) e Brundiers et al. (2021).

A aproximação entre esse referencial e os objetivos dos programas de pós-graduação em Ciências Ambientais voltados à gestão municipal revela convergências significativas, como pontua Jacobi (2005), que explica que a formação ambiental que não se ancora em competências integradoras corre o risco de produzir profissionais tecnicamente competentes, mas incapazes de articular saberes em contextos de gestão complexa. Dessa maneira, a capacidade de atuar na gestão



ambiental integrada em municípios pressupõe, precisamente, o pensamento sistêmico e a competência estratégica; a análise de fenômenos ambientais urbanos e rurais mobiliza a competência antecipatória e o pensamento sistêmico; e a construção de novas referências e tecnologias aplicadas a soluções ambientais, demanda ainda, a articulação entre competência normativa, estratégica e de implementação. Não se trata, portanto, de uma adoção acrítica de um modelo externo, mas do reconhecimento de que o quadro proposto por Wiek et al. (2011) e Brundiers et al. (2021) oferece uma linguagem conceitual capaz de organizar e potencializar os propósitos formativos já enunciados por esses programas.

Cabe, contudo, uma ressalva de ordem epistemológica. O referencial das competências para a sustentabilidade foi desenvolvido predominantemente, a partir de contextos do Norte Global, o que impõe cautela na sua transposição para realidades como a brasileira, marcadas por assimetrias históricas no acesso a recursos, por formas plurais de relação com o território e por tradições intelectuais próprias no campo ambiental (Leff, 2011; Porto-Gonçalves, 2006). Incorporar criticamente esse referencial significa, portanto, não apenas aplicá-lo, mas interrogá-lo à luz das especificidades dos municípios brasileiros e das demandas concretas que se apresentam aos profissionais que neles atuam.

3. EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A INTERDISCIPLINARIDADE COMO HORIZONTES FORMATIVOS

A Educação para o Desenvolvimento Sustentável constitui um dos marcos orientadores mais consolidados nas políticas educacionais voltadas à sustentabilidade em escala global (Cardoso, Novaes, Sabonaro, 2026; Duda, 2026; Malta, 2025; Rodrigues, 2024; Débora Zumkeller.). Reconhecida como elemento central da Agenda 2030 e do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4, a EDS é compreendida pela UNESCO (2017) não como uma disciplina específica, mas como uma orientação pedagógica transversal, que busca capacitar indivíduos e coletividades para a tomada de decisões informadas e para a adoção de ações responsáveis diante dos desafios socioambientais contemporâneos. Seu pressuposto fundamental é o de que a crise ambiental não é apenas um problema técnico a ser resolvido por especialistas, mas uma crise civilizatória que interpela os modos de conhecer, de ensinar e de aprender (Gadotti, 2008; Tristão, 2004).

No âmbito da educação superior e, especificamente, dos programas de pós-graduação, a EDS coloca exigências que vão além da atualização curricular. Trata-se de repensar as finalidades da formação, tarefa que, segundo Santos (2010), implica questionar a própria racionalidade cognitiva hegemônica que organiza a universidade moderna e abrir espaço para formas plurais de produção do conhecimento, os critérios de relevância do conhecimento produzido e as relações



entre a universidade e os territórios nos quais seus egressos atuarão. Nesse sentido, a EDS se articula de forma indissociável com a questão da interdisciplinaridade, na medida em que os fenômenos socioambientais não se deixam apreender por nenhuma disciplina isolada e exigem a construção de referenciais que integrem perspectivas das ciências naturais, das ciências sociais, da economia, da saúde coletiva e de outros campos do saber (RODRIGUES, 2024; Jacobi, 2005; Carvalho, 2012).

A interdisciplinaridade, contudo, é um conceito que comporta diferentes graus e modalidades, e sua invocação frequente nos documentos institucionais nem sempre corresponde a práticas efetivamente integradoras. Japiassu (1976), em obra seminal para o debate brasileiro, já distinguia entre a multidisciplinaridade — mera justaposição de disciplinas sem integração conceitual —, a interdisciplinaridade — caracterizada pela interação entre disciplinas com vistas à construção de quadros analíticos comuns — e a transdisciplinaridade — que pressupõe a superação das fronteiras disciplinares e a incorporação de saberes não acadêmicos na produção do conhecimento. Fazenda (2012) complementa essa perspectiva ao destacar que a interdisciplinaridade pressupõe uma atitude de abertura e humildade diante do conhecimento do outro, envolvendo não apenas a dimensão epistemológica, mas também a dimensão ética da prática acadêmica. A transdisciplinaridade, por sua vez, conforme Nicolescu (1999), vai além da integração disciplinar ao propor uma lógica de pensamento que reconhece múltiplos níveis de realidade e assume a complexidade como princípio organizador do conhecimento.

Para a formação em Ciências Ambientais, essa distinção não é trivial: um programa que reúne docentes de diferentes áreas sem promover a efetiva integração entre seus saberes reproduz a lógica disciplinar sob uma aparência interdisciplinar — problema que, conforme Cerqueira-Neto et al. (2021), permanece como um dos principais desafios metodológicos dos programas de pós-graduação em Ciências Ambientais no Brasil.

Dessa forma, para que os programas de pós-graduação em Ciências Ambientais no Brasil sejam acolhidos, nos apoiados nas ideias de Morin (2000), destacamos que o autor ao propor o conceito do pensamento complexo como paradigma epistemológico, oferece uma contribuição fundamental para compreender por que a interdisciplinaridade não é apenas uma estratégia pedagógica, mas uma exigência do próprio objeto de estudo das ciências ambientais. Ainda de acordo com o pesquisador (2000) os fenômenos socioambientais são, por natureza, fenômenos complexos — atravessados por incertezas, por não linearidades, por relações de retroalimentação e por dimensões que escapam à quantificação. Formá-los para compreender e intervir sobre esses fenômenos implica, portanto, desenvolver nos mestrandos uma tolerância epistêmica à complexidade, isto é, a capacidade de operar com conhecimentos provisórios, contraditórios e situados, sem abdicar do rigor analítico.



Leff (2011), por sua vez, contribui para esse debate ao introduzir o conceito de saber ambiental, entendido como um campo de conhecimento que emerge precisamente da insuficiência das disciplinas existentes para dar conta da crise ambiental. Segundo o autor ainda, o saber ambiental não é a soma dos saberes disciplinares, mas uma nova racionalidade que articula natureza, cultura, tecnologia e política a partir de uma perspectiva crítica e emancipatória. Complementando essa perspectiva, Porto-Gonçalves (2006) argumenta que qualquer projeto formativo comprometido com a sustentabilidade deve partir do reconhecimento das assimetrias de poder que estruturam a relação entre sociedade e natureza nos países do Sul Global, articulando o saber ambiental às lutas concretas por justiça territorial e ambiental. Essa perspectiva é particularmente relevante para programas situados em países da América Latina, nos quais as assimetrias de poder, as desigualdades territoriais e as formas de injustiça ambiental constituem dimensões incontornáveis de qualquer projeto formativo comprometido com a sustentabilidade.

A articulação entre EDS e interdisciplinaridade configura, assim, o horizonte formativo no qual o presente artigo se situa. Não se trata de adotar a EDS como um conjunto de conteúdos a serem transmitidos, nem de reivindicar a interdisciplinaridade como valor em si mesmo, mas de compreender ambas como orientações epistemológicas e pedagógicas que, em conjunto, definem o tipo de formação que os desafios socioambientais contemporâneos demandam. É nesse horizonte que a inteligência artificial pode ser convocada — não como solução técnica para problemas pedagógicos, mas como mediação que, se bem incorporada, pode ampliar as capacidades analíticas, colaborativas e propositivas dos profissionais em formação.

4. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO MEDIAÇÃO NA FORMAÇÃO E NA PD&I EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

A inteligência artificial constitui, no momento presente, um dos fenômenos tecnológicos de maior alcance e de mais difícil circunscrição conceitual. Compreendida em sentido amplo como o conjunto de técnicas computacionais capazes de realizar tarefas que, até recentemente, exigiam capacidades cognitivas humanas — como reconhecimento de padrões, aprendizado a partir de dados, geração de linguagem e tomada de decisão em ambientes complexos —, a IA não representa uma tecnologia singular, mas uma constelação de abordagens, algoritmos e sistemas com características, potencialidades e implicações bastante distintas entre si (Russell; Norvig, 2021).

Para os fins deste artigo, é útil distinguir ao menos três modalidades com relevância direta para o campo ambiental, a saber: (i) o aprendizado de máquina, aplicado à identificação de padrões em grandes volumes de dados estruturados e não estruturados; (ii) o aprendizado profundo, especialmente eficaz no processamento de imagens, sons e séries temporais; e (iii) a IA generativa,



capaz de produzir textos, sínteses e conteúdos a partir de instruções em linguagem natural, com implicações específicas para os processos de ensino e de produção científica. Essa heterogeneidade interna exige que a incorporação da IA nos processos formativos e de pesquisa seja precedida de uma compreensão crítica de suas especificidades, e não de uma adesão genérica ao entusiasmo tecnológico que frequentemente acompanha sua difusão pública. Selwyn (2019) alerta, nesse sentido, que a incorporação de tecnologias nos contextos educacionais raramente é neutra, sendo sempre mediada por escolhas políticas, econômicas e pedagógicas que precisam ser explicitadas e criticamente debatidas — advertência especialmente pertinente para o campo das Ciências Ambientais, cujos compromissos formativos exigem coerência entre os meios utilizados e os fins perseguidos.

4.1 Aplicações no campo ambiental e na gestão municipal

No campo das ciências ambientais, as aplicações da IA têm se expandido de forma acelerada, reconfigurando os modos de produzir conhecimento sobre fenômenos socioambientais e de apoiar decisões de gestão. Rolnick et al. (2022), em mapeamento abrangente das interseções entre IA e mudanças climáticas, identificaram mais de cem domínios de aplicação. No âmbito da gestão ambiental municipal, três domínios merecem destaque particular.

O primeiro é o monitoramento ambiental. Técnicas de aprendizado profundo aplicadas ao processamento de imagens de sensoriamento remoto têm permitido o acompanhamento contínuo de desmatamento, de mudanças no uso e cobertura do solo e de degradação de corpos hídricos em escalas que seriam inviáveis por métodos convencionais (Reichstein et al., 2019). No contexto brasileiro, iniciativas como o sistema DETER do INPE já incorporam componentes de aprendizado de máquina para detecção automática de alertas de desmatamento, e modelos similares têm sido desenvolvidos para contextos urbanos e para outros biomas.

O segundo domínio é a modelagem e previsão de fenômenos ambientais. Modelos baseados em aprendizado de máquina têm demonstrado desempenho expressivo em tarefas como previsão de inundações urbanas, modelagem da qualidade do ar em escala local e previsão de eventos extremos como secas e ondas de calor (Reichstein et al., 2019). Para municípios brasileiros sujeitos a riscos climáticos crescentes, a disponibilidade de modelos preditivos mais precisos e computacionalmente acessíveis representa uma contribuição significativa para a capacidade de planejamento e resposta institucional.

O terceiro domínio é o apoio à tomada de decisão em gestão ambiental. Sistemas baseados em IA têm sido desenvolvidos para auxiliar gestores municipais na priorização de áreas para recuperação de vegetação nativa, na identificação de vulnerabilidades socioambientais em territórios urbanos e na avaliação de alternativas de uso do solo. Esses sistemas não substituem o



julgamento dos gestores, mas ampliam sua capacidade de processar informações complexas e de avaliar consequências de diferentes cursos de ação antes de implementá-los.

4.2 Potencialidades pedagógicas e o lugar da IA generativa

Do ponto de vista pedagógico, a IA oferece possibilidades relevantes para a formação interdisciplinar. Como exemplo, plataformas de análise geoespacial baseadas em aprendizado de máquina — como o *Google Earth Engine* — permitem que equipes com formações distintas (biólogos, geógrafos, engenheiros ambientais, assistentes sociais) analisem colaborativamente dados de sensoriamento remoto para diagnósticos socioambientais territorializados, integrando perspectivas complementares em torno de um objeto comum (Reichstein et al., 2019).

Dessa maneira, ferramentas de análise de dados geoespaciais permitem que profissionais com diferentes formações de base — biólogos, engenheiros, geógrafos, economistas, assistentes sociais — desenvolvam competências analíticas comuns a partir de objetos concretos e territorialmente situados, favorecendo a integração interdisciplinar, de forma mais orgânica do que a simples coexistência em disciplinas compartilhadas (Zawacki-Richter et al., 2019; Alamäki et al., 2024; Malta, 2025). A simulação de cenários socioambientais complexos, por sua vez, cria condições para experiências de aprendizagem que aproximam os mestrandos de situações reais de gestão sem os constrangimentos logísticos e éticos da intervenção direta nos territórios.

A partir deste contexto, destacamos que a IA generativa merece atenção específica no contexto da formação de pesquisadores. Selwyn (2022) alerta para o risco de que seu uso irrefletido contribua para uma superficialização das práticas de escrita acadêmica — que são, em si mesmas, práticas epistêmicas fundamentais para a formação do pesquisador — e para uma homogeneização dos modos de enquadrar problemas de pesquisa.

Nessa mesma direção, Almeida, Fernandes Junior e Fernandes (2025) argumentam que o letramento digital docente não deve ser entendido apenas como domínio técnico, mas como capacidade crítica de compreender o funcionamento, os interesses e os impactos das tecnologias na prática educativa — perspectiva que se aplica igualmente à formação de pesquisadores em nível de pós-graduação. No entanto, sua incorporação crítica — como objeto de análise e ferramenta de apoio, mas não como substituta do pensamento — pode constituir uma experiência pedagógica valiosa, especialmente quando os mestrandos são levados a avaliar os outputs gerados à luz de critérios epistemológicos, éticos e contextuais que as ferramentas não são capazes de aplicar autonomamente.

4.3 Limites e tensões: uma perspectiva crítica

A incorporação da IA nos processos formativos e de PD&I em Ciências Ambientais deve ser acompanhada de uma perspectiva crítica que considere ao menos três dimensões. A primeira diz



respeito aos limites epistêmicos da IA: sistemas baseados em aprendizado de máquina são treinados a partir de dados históricos e tendem a reproduzir padrões do passado, o que é problemático em contextos de mudança socioambiental acelerada e de alta incerteza. Agrava esse limite o fato de que os municípios brasileiros de pequeno e médio porte frequentemente carecem de séries históricas robustas de dados ambientais, restringindo a aplicabilidade direta de modelos desenvolvidos em contextos com infraestrutura de dados mais consolidada.

A segunda dimensão concerne às implicações éticas e políticas do uso de IA em contextos de gestão ambiental. Decisões sobre uso do solo, distribuição de recursos hídricos ou resposta a desastres não são problemas técnicos neutros — são decisões que distribuem benefícios e ônus de forma diferenciada entre grupos sociais com distintas capacidades de influenciar os processos decisórios. A delegação dessas decisões a sistemas algorítmicos pode obscurecer conflitos de interesse, conferir aparência de objetividade técnica a escolhas fundamentalmente políticas e reproduzir desigualdades preexistentes quando os dados de treinamento refletem estruturas sociais historicamente injustas (Benjamin, 2019; O'neil, 2016; Abulibdeh; Zaidan; Abulibdeh, 2024; Malta, 2025; Gonsales, 2022).

A terceira dimensão é de ordem ecológica e constitui uma das tensões mais relevantes para o campo específico das ciências ambientais. O desenvolvimento e a operação de sistemas de IA demandam infraestruturas computacionais de alto consumo energético e dependem da extração de minerais raros cujos impactos socioambientais são significativos, especialmente nas regiões do Sul Global onde se concentram as reservas (Crawford, 2021). Essa contradição interna — uma tecnologia de alto custo ambiental mobilizada em nome da sustentabilidade — não invalida seu uso, mas impõe que seja explicitamente problematizada nos processos formativos.

Autores como Birhane et al. (2023) e Crawford (2021) têm documentado como os sistemas de IA, longe de serem ferramentas neutras, reproduzem e amplificam visões de mundo, vieses e estruturas de poder que precisam ser reconhecidos criticamente nos contextos de formação, principalmente em contexto de Pós-graduação *Stricto-sensu*, o que é especialmente relevante em um campo, como o das Ciências Ambientais, comprometido com a justiça socioambiental. Dessa maneira, evidenciamos, que Programas de pós-graduação em Ciências Ambientais que incorporam a IA sem discutir seu próprio impacto ecológico incorrem em uma inconsistência que fragiliza seu compromisso com os princípios da EDS, uma vez que, essas tensões não invalidam o potencial da IA como mediação formativa e como instrumento de PD&I em Ciências Ambientais, mas impõem que sua incorporação seja orientada por uma racionalidade que subordine o uso tecnológico aos objetivos formativos e aos compromissos éticos do campo.

Nesse sentido, a IA não deve ser tratada como um fim em si mesmo, nem como solução universal para os desafios da formação interdisciplinar, mas como uma mediação — no sentido



vigotskiano do termo — capaz de ampliar as capacidades cognitivas e práticas dos sujeitos em formação quando inserida em contextos pedagógicos intencionalmente planejados (Vygotsky, 1998). É essa perspectiva que orienta a proposição do framework apresentado na seção seguinte.

5. UM FRAMEWORK ARTICULADOR: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, COMPETÊNCIAS PARA A SUSTENTABILIDADE E FORMAÇÃO INTERDISCIPLINAR

As seções precedentes percorreram três eixos teóricos que, tomados isoladamente, já oferecem contribuições relevantes para pensar a formação em Ciências Ambientais: (i) o referencial das competências para a sustentabilidade, (ii) os princípios da EDS e da interdisciplinaridade, e (iii) as potencialidades e limites da IA como mediação pedagógica e instrumental de PD&I. O desafio desta seção é articular esses eixos em um framework conceitual que não se limite à justaposição dos referenciais, mas que proponha relações funcionais entre eles, oferecendo uma linguagem organizadora para programas de pós-graduação comprometidos com a formação de profissionais capazes de enfrentar os desafios socioambientais municipais.

A noção de framework conceitual adotada aqui aproxima-se da perspectiva de Jabareen (2009), para quem um framework não é um modelo preditivo nem uma teoria formal, mas uma rede de conceitos inter-relacionados que, em conjunto, fornecem uma compreensão abrangente de um fenômeno. Nesse sentido, o framework proposto não pretende funcionar como um protocolo de implementação curricular, mas como um instrumento heurístico que orienta decisões pedagógicas, institucionais e de pesquisa em programas de formação ambiental. Sua utilidade reside precisamente em sua capacidade de tornar explícitas as relações entre dimensões que frequentemente permanecem implícitas ou desarticuladas nas práticas formativas.

Diferentemente de modelos normativos que prescrevem sequências fixas de ação, um framework conceitual opera como uma gramática — define as categorias e as relações possíveis, mas deixa às instituições e aos sujeitos a responsabilidade de compor, a partir dessas categorias, as práticas mais adequadas aos seus contextos específicos.

5.1 A arquitetura do framework: três camadas interdependentes

O framework organiza-se em torno de três camadas interdependentes, cuja distinção é analítica — na prática formativa, elas operam de forma simultânea e mutuamente constitutiva. A primeira camada, de natureza epistemológica, é constituída pela EDS e pela interdisciplinaridade como horizontes orientadores. Essa camada define os compromissos fundamentais do programa formativo — com a complexidade, com a integração de saberes, com a justiça socioambiental e com a formação de sujeitos capazes de agir reflexivamente sobre os territórios onde atuam. Ela não é operacional por si mesma, mas funciona como critério regulador das escolhas realizadas nas



camadas subsequentes, impedindo que a incorporação de novas tecnologias ou metodologias se faça à revelia dos princípios que conferem identidade ao campo. É essa camada que responde à pergunta: *em nome de quê* o programa forma seus egressos?

A segunda camada, de natureza formativa, é constituída pelas competências para a sustentabilidade propostas por Wiek et al. (2011) e refinadas por Brundiers et al. (2021). Essa camada traduz os horizontes epistemológicos em objetivos formativos concretos, definindo o perfil de egresso que o programa busca desenvolver. As competências de pensamento sistêmico, antecipatório, normativo, estratégico, interpessoal e de implementação funcionam, nesse framework, não como atributos individuais a serem desenvolvidos sequencialmente, mas como capacidades que se constituem de forma relacional e situada, a partir de experiências pedagógicas que coloquem os mestrandos em contato com problemas reais de gestão ambiental municipal. É nessa camada que reside o núcleo formativo do programa, e é em função dela que as escolhas metodológicas e tecnológicas devem ser avaliadas. Ela responde à pergunta: *o que* o programa busca desenvolver nos sujeitos em formação?

A terceira camada, de natureza instrumental e mediadora, é constituída pela inteligência artificial em suas diferentes modalidades de aplicação. Nessa camada, a IA é compreendida não como um componente autônomo do processo formativo, mas como um conjunto de mediações tecnológicas que, quando incorporadas de forma intencional e criticamente orientada, podem potencializar o desenvolvimento das competências definidas na segunda camada. A relação entre essas duas camadas não é de subordinação mecânica, mas de pertinência pedagógica: cada ferramenta ou abordagem baseada em IA deve ser avaliada pela sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento de competências específicas para a sustentabilidade e de fazê-lo em consonância com os princípios interdisciplinares e da EDS que orientam a primeira camada. Essa camada responde à pergunta: *com quais mediações* o programa pode potencializar sua ação formativa?

A relação entre as três camadas não é hierárquica no sentido de que uma seria mais importante que as outras, mas é direcional: a primeira orienta a segunda, e a segunda orienta a terceira. Isso significa que decisões sobre quais ferramentas de IA incorporar ao programa devem ser precedidas pela clareza sobre quais competências se pretende desenvolver, que por sua vez deve ser precedida pela clareza sobre os compromissos epistemológicos e éticos que fundamentam o projeto formativo. Inverter essa ordem — incorporar ferramentas de IA por sua novidade ou disponibilidade, sem ancoragem em objetivos formativos e em princípios epistemológicos explícitos — é um risco real nos contextos atuais de entusiasmo tecnológico, e o framework proposto funciona precisamente como um dispositivo de resistência a essa inversão.

5.2 Articulações entre IA e competências para a sustentabilidade



A especificação das relações entre as ferramentas de IA e as competências para a sustentabilidade constitui o núcleo operacional do framework. Essas relações não são unívocas — uma mesma ferramenta pode contribuir para o desenvolvimento de múltiplas competências, dependendo do modo como é incorporada pedagogicamente —, mas é possível identificar articulações preferenciais que orientam as decisões de design formativo.

O uso de sistemas de análise geoespacial e de modelagem ambiental baseados em aprendizado de máquina contribui de forma direta para o desenvolvimento da competência de pensamento sistêmico. Ao permitir que os mestrandos visualizem e analisem interações complexas entre variáveis ambientais, econômicas e sociais em escala municipal — como as relações entre padrões de uso do solo, dinâmicas hidrológicas e vulnerabilidade social em bacias hidrográficas urbanas —, essas ferramentas criam condições para a apreensão empírica da complexidade que o pensamento sistêmico pressupõe como disposição cognitiva. A experiência de trabalhar com dados reais de municípios brasileiros, processados por algoritmos que revelam padrões invisíveis à análise convencional, pode constituir um dispositivo pedagógico poderoso para o desenvolvimento dessa competência, desde que acompanhada de mediação docente que oriente a interpretação dos resultados à luz dos contextos sociais e políticos que os dados não capturam diretamente.

Ferramentas de simulação de cenários futuros apoiadas por IA articulam-se de forma natural com a competência antecipatória. A possibilidade de modelar os efeitos de diferentes decisões de gestão ambiental — como a implementação de corredores ecológicos, a regulação de zonas de amortecimento ou a adoção de sistemas de drenagem sustentável — sobre indicadores socioambientais ao longo do tempo cria condições para que os mestrandos desenvolvam a capacidade de construir e avaliar visões de futuro de forma fundamentada. É importante, contudo, que o uso dessas ferramentas seja acompanhado de uma discussão explícita sobre seus pressupostos e limitações — os cenários gerados por sistemas de IA são tão confiáveis quanto os dados e os modelos que os sustentam, e a formação de um profissional com competência antecipatória genuína requer que ele seja capaz de avaliar criticamente as projeções que utiliza, e não apenas de operá-las tecnicamente.

A análise de legislação ambiental, de políticas públicas e de documentos institucionais por meio de processamento de linguagem natural mobiliza a competência normativa ao expor os mestrandos à pluralidade de perspectivas, interesses e valores que atravessam a regulação socioambiental. A capacidade de identificar, a partir de grandes volumes de texto, as diferentes visões de sustentabilidade presentes em instrumentos legais e documentos de planejamento municipal — e de reconhecer as tensões e contradições entre elas — é constitutiva da competência normativa tal como definida por Wiek et al. (2011). Ferramentas de IA que permitem esse tipo de



análise em escala e velocidade que seriam inviáveis por outros meios podem, portanto, enriquecer significativamente as experiências formativas orientadas para essa competência.

A competência estratégica, que envolve a capacidade de desenhar e implementar intervenções transformadoras, pode ser potencializada pelo uso de sistemas de apoio à decisão baseados em IA, capazes de integrar múltiplas variáveis e de identificar combinações de ações com maior probabilidade de produzir os resultados desejados em contextos de alta complexidade. No âmbito da gestão ambiental municipal, isso pode incluir sistemas que apoiem a priorização de investimentos em saneamento, a identificação de áreas prioritárias para recuperação de vegetação nativa ou a alocação de recursos para programas de educação ambiental. A formação de profissionais capazes de utilizar esses sistemas de forma crítica e reflexiva — avaliando suas recomendações à luz de critérios éticos, políticos e contextuais que os algoritmos não capturam — constitui um objetivo formativo relevante e ainda pouco explorado na literatura sobre educação ambiental.

Plataformas colaborativas mediadas por IA, por sua vez, podem fortalecer tanto a competência interpessoal quanto a de implementação. A competência interpessoal — que envolve habilidades de comunicação, colaboração e mediação de conflitos em contextos de diversidade disciplinar e cultural — pode ser desenvolvida em experiências formativas que utilizem ambientes digitais inteligentes para facilitar o trabalho em equipes interdisciplinares, apoiar a construção de consensos e tornar visíveis os diferentes modos de enquadrar um mesmo problema socioambiental a partir de distintas formações de base. A competência de implementação, por sua vez, pode ser fortalecida pelo uso de ferramentas de gestão de projetos apoiadas por IA, que permitam aos mestrandos simular a execução de intervenções reais, antecipando obstáculos institucionais, conflitos de interesse e restrições orçamentárias que caracterizam a gestão ambiental nos municípios brasileiros.

O Quadro 1, apresentado a seguir, sintetiza as articulações preferenciais entre modalidades de IA e competências para a sustentabilidade, indicando também a conexão de cada articulação com os princípios da EDS e da interdisciplinaridade que orientam a primeira camada do framework.

Quadro 1 — Articulações entre modalidades de IA e competências para a sustentabilidade

Modalidade de IA	Competência prioritária	Conexão com EDS/Interdisciplinaridade
Análise geoespacial e modelagem ambiental	Pensamento sistêmico	Integração de saberes; complexidade socioambiental
Simulação de cenários futuros	Competência antecipatória	Orientação para o futuro; incerteza e transformação
Processamento de linguagem natural	Competência normativa	Pluralidade de saberes; justiça socioambiental
Sistemas de apoio à decisão	Competência estratégica	Ação situada; pertinência territorial
Plataformas colaborativas inteligentes	Competência interpessoal	Interdisciplinaridade; diálogo de saberes
Gestão de projetos apoiada por IA	Competência de implementação	Transformação institucional; escala municipal



Fonte: As autoras

5.3 Condições institucionais para a operacionalização do framework

A proposição de um framework conceitual seria incompleta se não reconhecesse as condições institucionais que favorecem ou dificultam sua operacionalização. Programas de pós-graduação em Ciências Ambientais situados em universidades públicas brasileiras operam em contextos marcados por restrições orçamentárias, assimetrias de infraestrutura tecnológica, heterogeneidade na formação dos docentes e pressões de produtividade acadêmica que nem sempre são compatíveis com as exigências de uma formação genuinamente interdisciplinar. Ignorar essas condições seria transformar o framework em um ideal normativo descolado da realidade institucional que pretende orientar. Pesquisa sobre a presença de temas transversais nos currículos de licenciatura em Geografia de universidades federais de diferentes regiões do país evidencia que, mesmo diante de marcos normativos consolidados, a implementação efetiva permanece fragmentada e desigual entre instituições (Santos; Fernandes de Oliveira; Almeida, 2025) — padrão que tende a se reproduzir no campo da formação ambiental.

Nesse sentido, três condições parecem particularmente relevantes para a implementação do framework proposto. A primeira é a existência de espaços institucionais de integração interdisciplinar — disciplinas, seminários, laboratórios ou grupos de pesquisa que reúnam docentes e mestrandos de diferentes formações em torno de problemas comuns, criando as condições para que a interdisciplinaridade deixe de ser uma declaração de intenções e se torne uma prática efetiva.

A segunda condição é a disponibilidade de formação continuada para os docentes do programa em relação às ferramentas de IA relevantes para o campo ambiental — não necessariamente uma formação técnica aprofundada, mas uma familiaridade suficiente para que os professores possam orientar o uso crítico e pedagogicamente intencional dessas ferramentas por seus mestrandos.

A terceira condição é a existência de parcerias institucionais com municípios e com órgãos de gestão ambiental que permitam que as experiências formativas mediadas por IA se ancorem em problemas reais e territorialmente situados, evitando que o uso dessas ferramentas se reduza a exercícios abstratos desvinculados dos desafios concretos que os egressos enfrentarão em sua atuação profissional.

É importante sublinhar que o framework não pressupõe a disponibilidade irrestrita de infraestrutura tecnológica avançada. Ao contrário, sua lógica organizadora é aplicável mesmo em contextos de acesso parcial a ferramentas de IA, desde que as escolhas tecnológicas sejam orientadas pelos critérios epistemológicos e formativos das camadas anteriores. O que o framework exige, fundamentalmente, não é sofisticação tecnológica, mas intencionalidade pedagógica — a



capacidade institucional de integrar os recursos disponíveis em torno de objetivos formativos claros e coerentes com os princípios da EDS e da interdisciplinaridade.

Por fim, cabe reconhecer que o framework proposto não esgota as possibilidades de articulação entre seus componentes, nem pretende oferecer respostas definitivas para os desafios da formação ambiental interdisciplinar. Seu valor reside em sua capacidade de organizar o debate, de tornar visíveis as relações entre dimensões frequentemente tratadas de forma isolada e de oferecer aos programas de pós-graduação em Ciências Ambientais um instrumento conceitual para a reflexão sobre suas próprias práticas formativas. A verificação empírica de sua pertinência e aplicabilidade constitui uma agenda de pesquisa que transcende os limites deste ensaio, mas que dele pode tomar impulso.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo partiu do reconhecimento de que os desafios socioambientais contemporâneos, em especial aqueles que se manifestam na escala municipal, exigem formas de formação profissional que a organização disciplinar tradicional tem sido incapaz de prover. A complexidade dos fenômenos que envolvem a gestão ambiental integrada — atravessada por dinâmicas ecológicas, econômicas, políticas e culturais que se interpenetram de forma não linear — demanda profissionais capazes de pensar sistemicamente, de antecipar cenários, de negociar visões de sustentabilidade e de implementar soluções em contextos marcados pela incerteza e pela diversidade de interesses. É nesse horizonte que o artigo se situou, propondo uma articulação teórica entre três eixos que, embora frequentemente tratados de forma isolada na literatura, guardam entre si relações de complementaridade e de mútua potencialização.

O objetivo proposto — desenvolver um framework articulador entre competências para a sustentabilidade, formação interdisciplinar e potencialidades pedagógicas da inteligência artificial — foi alcançado ao longo dos três movimentos teóricos desenvolvidos nas seções anteriores, com sua síntese mais evidente na proposição das três camadas interdependentes do framework (epistemológica, formativa, instrumental) e nas articulações preferenciais sistematizadas no Quadro 1.

A justificativa inicial, ancorada na crescente presença da IA nos processos formativos e na lacuna de produções que articulem esses elementos de forma sistemática no contexto da pós-graduação em Ciências Ambientais, confirmou-se ao longo da revisão da literatura: os referenciais mobilizados revelam não apenas a pertinência da articulação proposta, mas sua urgência diante dos desafios socioambientais contemporâneos.

Os resultados propostos — subsidiar programas de pós-graduação com um referencial conceitual orientador e tornar explícitas as relações entre dimensões frequentemente desarticuladas



nas práticas institucionais — evidenciam-se na estrutura do framework e nas implicações políticas e pedagógicas discutidas nas seções 5.2 e 5.3. Cabe registrar, ainda, que a complexidade do tema levou à incorporação de referenciais teóricos — como as contribuições de Birhane et al. (2023) sobre vieses em sistemas de IA, de Crawford (2021) sobre os custos ecológicos da IA e de Porto-Gonçalves (2006) sobre as assimetrias do Sul Global — que não haviam sido previstos na concepção inicial do artigo, mas que se mostraram indispensáveis para o tratamento rigoroso e eticamente comprometido da questão.

Logo, evidenciamos que o primeiro movimento do artigo revisitou o referencial das competências para a sustentabilidade com êxito, argumentando que o quadro proposto por Wiek et al. (2011) e refinado por Brundiers et al. (2021) oferece uma linguagem conceitual capaz de organizar os objetivos formativos dos programas de pós-graduação em Ciências Ambientais, desde que sua apropriação seja feita de forma crítica e atenta às especificidades dos contextos latino-americanos. Já o segundo movimento situou a EDS e a interdisciplinaridade como horizontes epistemológicos que conferem identidade e direção ao campo, diferenciando a formação ambiental de uma simples capacitação técnica e inscrevendo-a em um projeto mais amplo de transformação das relações entre sociedade, conhecimento e natureza e o terceiro movimento analisou as potencialidades e os limites da IA como mediação formativa e instrumental de PD&I, recusando tanto o entusiasmo acrítico quanto a recusa apriorística, e propondo que sua incorporação seja orientada por critérios pedagógicos e éticos derivados dos dois eixos anteriores.

Verificamos que a síntese desses movimentos resultou na proposição de um framework conceitual organizado em três camadas interdependentes — epistemológica, formativa e instrumental —, cujo valor reside não na prescrição de soluções universais, mas na capacidade de tornar explícitas as relações entre dimensões que frequentemente permanecem desarticuladas nas práticas institucionais. O framework propõe que a incorporação da IA na formação em Ciências Ambientais seja avaliada permanentemente em função de sua pertinência para o desenvolvimento das competências para a sustentabilidade e de sua coerência com os princípios da EDS e da interdisciplinaridade. Essa lógica de avaliação contínua é, em si mesma, uma contribuição do artigo para os processos de reflexão institucional dos programas de pós-graduação no país.

O framework proposto tem implicações que transcendem o âmbito dos programas de pós-graduação individualmente considerados e alcançam o plano das políticas de avaliação e fomento da pós-graduação brasileira. A CAPES, ao definir critérios de avaliação para programas da área de Ciências Ambientais, sinaliza expectativas sobre perfis de egresso, sobre a natureza da produção científica esperada e sobre as relações entre os programas e seus territórios de inserção. O framework aqui proposto pode oferecer subsídios para que essas expectativas sejam formuladas de



forma mais explícita e coerente, especialmente no que diz respeito à integração entre formação interdisciplinar, inovação tecnológica e compromisso com a sustentabilidade em escala municipal. Nesse sentido, o artigo não se dirige apenas a docentes e pesquisadores da área, mas também a gestores de programas e a formuladores de políticas de pós-graduação interessados em fortalecer a contribuição dos programas de Ciências Ambientais para o desenvolvimento territorial sustentável no Brasil.

É necessário reconhecer, contudo, os limites inerentes a um ensaio teórico-conceitual. A ausência de verificação empírica impede afirmações categóricas sobre a eficácia do framework em contextos específicos de formação, e a natureza ainda muito dinâmica do campo da IA significa que parte das ferramentas e abordagens discutidas pode ser significativamente transformada em um horizonte temporal relativamente curto. Esses limites não invalidam a contribuição proposta, mas delimitam seu alcance e indicam a necessidade de pesquisas futuras que testem, refinem e situem empiricamente as articulações conceituais aqui desenvolvidas. Estudos de caso em programas de pós-graduação em Ciências Ambientais que já incorporam ferramentas de IA em suas práticas pedagógicas e de pesquisa constituem uma direção promissora, assim como investigações sobre as percepções de mestrandos e docentes acerca das potencialidades e dos limites dessas mediações tecnológicas em contextos formativos concretos. A construção de evidências empíricas sobre a aplicabilidade do framework em diferentes regiões do Brasil — considerando as assimetrias de infraestrutura, de capacidade institucional e de acesso a tecnologias que caracterizam o território nacional — representa, em particular, uma agenda de pesquisa com alto potencial de contribuição tanto científica quanto para a formulação de políticas públicas.

Por fim, cabe ressaltar que a questão central que atravessa este artigo — como formar profissionais capazes de enfrentar a complexidade socioambiental do nosso tempo — não admite resposta tecnológica. A IA pode ampliar capacidades, acelerar análises e criar novas possibilidades de aprendizagem, mas não substitui o julgamento situado, o compromisso ético com os territórios e as populações, nem a disposição para agir diante da incerteza que caracteriza a atuação do gestor ambiental. São essas qualidades, em última instância, que uma formação interdisciplinar comprometida com a sustentabilidade deve cultivar — e é em função delas que qualquer mediação tecnológica, incluindo a inteligência artificial, deve ser permanentemente avaliada.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. C. D.; FERNANDES JUNIOR, A. M.; FERNANDES, D. M. M. Cartografia da inteligência artificial e da proteção de dados na educação básica. **Educação & Sociedade**, Campinas, v. 46, e300372, 2025. Disponível em <https://doi.org/10.1590/ES.300372> Acesso em: 6 abr. 2026.

BENJAMIN, R. **Race after technology**: abolitionist tools for the new Jim Code. Cambridge: Polity Press, 2019.



ABULIBDEH, A.; ZAIDAN, E.; ABULIBDEH, R. Navigating the confluence of artificial intelligence and education for sustainable development in the era of Industry 4.0: challenges, opportunities, and ethical dimensions. **Journal of Cleaner Production**, v. 437, p. 140527, 2024.

ALAMÄKI, A. et al. Artificial intelligence literacy in sustainable development: a learning experiment in higher education. **Frontiers in Education**, 2024. DOI: 10.3389/educ.2024.1343406.

BIRHANE, A. et al. Science in the age of large language models. **Nature Reviews Physics**, v. 5, p. 277–280, 2023.

BRUNDIERS, K. et al. Key competencies in sustainability in higher education: toward an agreed-upon reference framework. **Sustainability Science**, v. 16, n. 1, p. 13–29, 2021.

CARDOSO, Giselle Cristina; NOVAES, André Lucas; SABONARO, Débora Zumkeller. Educação para o Desenvolvimento Sustentável: integração de competências técnicas e habilidades comportamentais nas disciplinas CTEM: Português. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 54–74, 2025. DOI: 10.34024/revbea.2025.v20.20258. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/20258>. Acesso em: 6 abr. 2026.

CARVALHO, I. C. M. **Educação ambiental: a formação do sujeito ecológico**. 6. ed. São Paulo: Cortez, 2012.

CERQUEIRA-NETO, S. P. G. et al. Ciências Ambientais: a interdisciplinaridade como desafio nas questões metodológicas. **Metodologias e Aprendizado**, v. 4, p. 1–10, 2021. DOI: 10.21166/metapre.v4i.1356.

CRAWFORD, K. **Atlas of AI: power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence**. New Haven: Yale University Press, 2021.

SILVA, Patrícia Gaspar Ferreira. Educação Ambiental 4.0: como a inteligência artificial pode incentivar cidades sustentáveis. **Aurum Editora**, p. 46-56, 2025.

DUDA, Robson Fernando et al. **Framework de apoio à governança dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável em instituições de ensino superior baseado em inteligência artificial e gestão do conhecimento**. 2026. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/272073>. Acesso em: 6 abr. 2026.

GADOTTI, M. **Educar para a sustentabilidade: uma contribuição à década da educação para o desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Instituto Paulo Freire, 2008.

GONSALES, Priscila. **Inteligência artificial, educação e pensamento complexo: caminhos para religação de saberes**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologias da Inteligência e Design Digital) - Programa de Estudos Pós-Graduados em Tecnologias da Inteligência e Design Digital da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.pucsp.br/handle/handle/26498>.

IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais — MUNIC 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

JABAREEN, Y. Building a conceptual framework: philosophy, definitions, and procedure. **International Journal of Qualitative Methods**, v. 8, n. 4, p. 49–62, 2009.

JACOBI, P. R. Educação ambiental: o desafio da construção de um pensamento crítico, complexo e reflexivo. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 233–250, 2005.

FAZENDA, I. C. A. **Interdisciplinaridade: história, teoria e pesquisa**. 18. ed. Campinas: Papirus, 2012.



- JAPIASSU, H. **Interdisciplinaridade e patologia do saber**. Rio de Janeiro: Imago, 1976.
- LE BOTERF, G. **Desenvolvendo a competência dos profissionais**. Porto Alegre: Artmed, 2003.
- LEAL FILHO, W. et al. Deploying digitalisation and artificial intelligence in sustainable development research. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, p. 4957–4988, 2023. DOI: 10.1007/s10668-022-02252-3. Acesso em 23 abr. 2026.
- LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. São Paulo: Cortez, 2011.
- LOUREIRO, C. F. B. **Trajetória e fundamentos da educação ambiental**. 4. ed. São Paulo: Cortez, 2012.
- MALTA, D. P. de L. N., VERNER, A. R., MOURA, C. C. de, CERQUEIRA, H. de G., OLIVEIRA, M. P. da S., SILVA, R. A., ... SANTOS, S. M. A. V.. Educação e sustentabilidade: promovendo a conscientização ambiental. **Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação**, 11(1), 86–100. Disponível em <https://doi.org/10.51891/rease.v11i1.17789> Acesso em 23 abr. 2026.
- MORIN, E. **Os sete saberes necessários à educação do futuro**. São Paulo: Cortez; Brasília: UNESCO, 2000.
- NICOLESCU, B. **O manifesto da transdisciplinaridade**. São Paulo: TRIOM, 1999.
- O'NEIL, C. **Weapons of math destruction: how big data increases inequality and threatens democracy**. New York: Crown, 2016.
- PERRENOUD, P. **Construir as competências desde a escola**. Porto Alegre: Artmed, 1999.
- PORTO-GONÇALVES, C. W. **A globalização da natureza e a natureza da globalização**. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.
- REICHSTEIN, M. et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. **Nature**, v. 566, p. 195–204, 2019.
- RODRIGUES, Gesinelly Kellen dos Santos. Da integração, da educação ambiental crítica. campus de Paranavaí. Centro de Ciências Humanas e da Educação Programa de Pós-Graduação em formação docente interdisciplinar-ppifor. 2024. Disponível em [file:///C:/Users/patricia.coelho/Downloads/DISSERTAOGESINELLYFinalizada%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/patricia.coelho/Downloads/DISSERTAOGESINELLYFinalizada%20(1).pdf) Acesso em 23 abr. 2026.
- ROLNICK, D. et al. Tackling climate change with machine learning. **ACM Computing Surveys**, v. 55, n. 2, p. 1–96, 2022.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2021.
- SANTOS, H. C.; FERNANDES DE OLIVEIRA, M. M.; ALMEIDA, S. C. D. A educação em direitos humanos nos currículos dos cursos de licenciatura em Geografia: análise de universidades federais brasileiras. **Revista GeoNordeste**, São Cristóvão, v. 36, n. 1, p. 85-101, jan./jun. 2025. <https://doi.org/10.33360/RGN.2318-2695.2025.i1.p.85-101> Acesso em 23 abr. 2026.
- SANTOS, B. de S. **A universidade no século XXI: para uma reforma democrática e emancipatória da universidade**. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2010.
- SELWYN, N. **Should robots replace teachers? AI and the future of education**. Cambridge: Polity Press, 2019.
- SELWYN, N. The future of AI and education: some cautionary notes. **European Journal of Education**, v. 57, n. 4, p. 620–631, 2022.



TRISTÃO, M. **A educação ambiental na formação de professores: redes de saberes**. São Paulo: Annablume; Vitória: Facitec, 2004.

UNESCO — UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Education for sustainable development goals: learning objectives**. Paris: UNESCO, 2017.

VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente**. 6. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

WIEK, A.; WITHYCOMBE, L.; REDMAN, C. L. Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development. **Sustainability Science**, v. 6, n. 2, p. 203–218, 2011.

ZAWACKI-RICHTER, O. et al. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education: where are the educators? **International Journal of Educational Technology in Higher Education**, v. 16, n. 39, 2019.