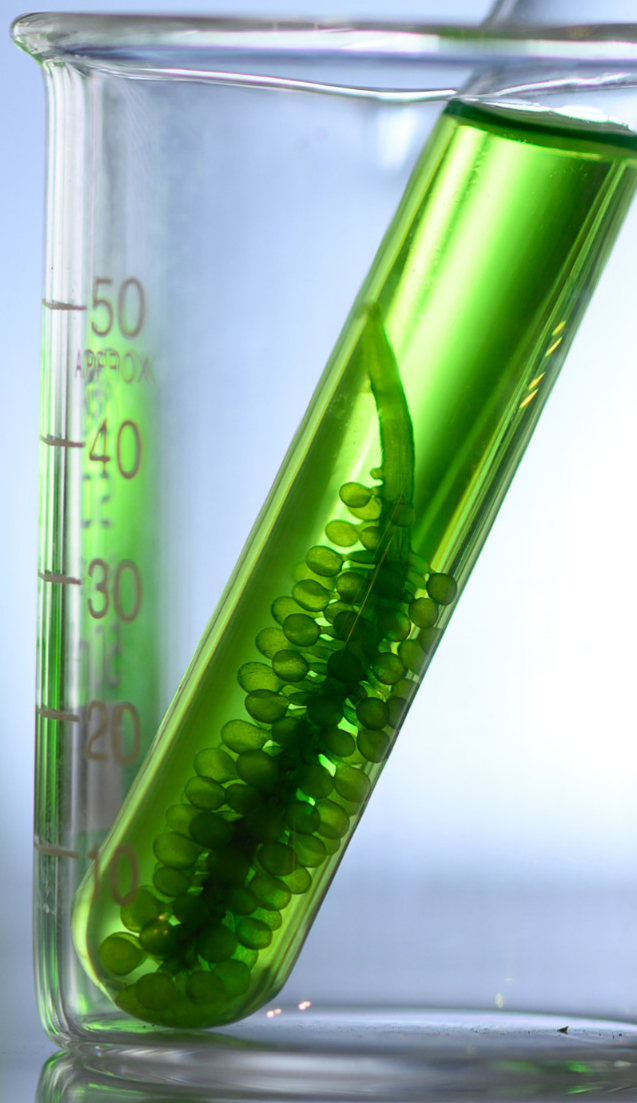


BIOTECNOLOGIA NO BRASIL

VOLUME VII

Milena Gaion Malosso (Org)
Ivan Monteiro dos Santos (Org)
Ricardo dos Santos Faria (Org)
Natasha Verdaska Meliciano
Eraldo Ferreira Lopes
Vera Lúcia Imbiriba Bentes
Sandriele de Oliveira Ramos
José Vagner Peres Faia
Eriana de Souza Batalha
Julia Kamilly Cordeiro do Nascimento



Milena Gaion Malosso
Ivan Monteiro dos Santos
Ricardo dos Santos Faria
Natasha Verdaska Meliciano
Eraldo Ferreira Lopes
Vera Lúcia Imbiriba Bentes
Sandriele de Oliveira Ramos
José Vagner Peres Faia
Eriana de Souza Batalha
Julia Kamily Cordeiro do Nascimento

Biotecnologia no Brasil - Volume VII

7ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

7ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Malosso, Milena Gaion
M419B Biotecnologia no Brasil - Volume VII

/ Milena Gaion Malosso. Ivan Monteiro dos Santos. Ricardo dos Santos Faria. Natasha Verdaska Meliciano. Eraldo Ferreira Lopes. Vera Lúcia Imbiriba Bentes. Sandriele de Oliveira Ramos. José Vagner Peres Faia. Eriana de Souza Batalha. Julia Kamily Cordeiro do Nascimento. – Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre, 2025

100 f.: il

DOI: 10.37423/2025.edcl1212

ISBN: 978-65-5367-710-4

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. biotecnologia 2. cultura-de-tecido-vegetal 3. aplicações I. Malosso, Milena Gaion II. Santos, Ivan Monteiro dos III. Faria, Ricardo dos Santos IV. Meliciano, Natasha Verdaska V. Lopes, Eraldo Ferreira VI. Bentes, Vera Lúcia Imbiriba VII. Ramos, Sandriele de Oliveira VIII. Faia, José Vagner Peres IX. Batalha, Eriana de Souza X. Nascimento, Julia Kamily Cordeiro do XI. Título

<https://doi.org/10.37423/2025.edcl1212>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2025.edcl1212



Resumo: A micropropagação vegetal é uma ferramenta biotecnológica fundamental para a clonagem de plantas de interesse econômico, medicinal e ornamental, permitindo a obtenção de mudas em larga escala, livres de patógenos e com elevada uniformidade genética. Entretanto, a formulação e padronização de soluções nutritivas ainda representam um desafio, visto que a resposta morfogênica varia de acordo com a espécie, o genótipo e as condições de cultivo. Este estudo teve como objetivo revisar sistematicamente a literatura científica sobre formulação e padronização de soluções aplicadas à micropropagação vegetal, utilizando o protocolo PRISMA 2020 para garantir rigor metodológico e reprodutibilidade. A busca em bases de dados como Scopus, Web of Science, PubMed, Scielo e Google Scholar resultou na identificação de 412 publicações, das quais 39 atenderam integralmente aos critérios de inclusão. Os resultados mostraram que o meio MS (Murashige & Skoog, 1962) continua sendo o mais empregado, embora modificações em sais minerais, fontes de nitrogênio e reguladores de crescimento sejam frequentemente necessárias para otimização do processo. A combinação de citocininas e auxinas permanece central, mas novas alternativas, como nanopartículas e extratos naturais, apresentam potencial promissor para reduzir custos e aumentar a eficiência. Conclui-se que a padronização de soluções deve ser compreendida como estratégia flexível e modular, adaptável às particularidades de grupos de espécies vegetais. O estabelecimento de protocolos mais robustos e escaláveis contribuirá não apenas para avanços científicos, mas também para a aplicação comercial da micropropagação, fortalecendo programas de conservação, melhoramento genético e agricultura sustentável.

Palavras-chave: Cultura de tecidos. Reguladores de crescimento. Conservação de germoplasma. Produção de mudas. Biotecnologia agrícola.

1. INTRODUÇÃO

A micropropagação vegetal constitui uma das principais ferramentas da biotecnologia aplicada à agricultura e à conservação de recursos genéticos, sendo amplamente empregada na clonagem de plantas de interesse econômico, ornamental e medicinal (George e Debergh, 2008). Por meio do cultivo *in vitro*, é possível obter grande número de mudas em curto espaço de tempo, livres de pragas e doenças, e com elevada uniformidade genética (Hussein *et al.*, 2020). Apesar do avanço das técnicas de cultura de tecidos, a formulação de soluções nutritivas padronizadas continua sendo um desafio, uma vez que diferentes espécies vegetais apresentam respostas variáveis à composição do meio, demandando ajustes específicos para cada protocolo de cultivo (Murashige e Skoog, 1962).

A relevância da formulação e padronização de soluções para micropropagação vegetal reside no impacto direto sobre a eficiência do processo, o custo de produção e a qualidade das mudas obtidas (Silva *et al.*, 2019). A ausência de protocolos universalizados, aliada à diversidade metabólica e fisiológica das espécies, torna indispensável a definição de meios de cultura otimizados, que assegurem o desenvolvimento adequado das plantas em todas as fases do cultivo *in vitro*. Nesse contexto, o estabelecimento de formulações consistentes contribui não apenas para a reprodutibilidade dos resultados experimentais, mas também para a aplicação comercial da micropropagação, favorecendo programas de melhoramento genético, conservação de espécies ameaçadas e expansão de cadeias produtivas agrícolas (Thorpe, 2007).

A questão norteadora deste estudo concentra-se na seguinte problemática: como desenvolver soluções padronizadas que possam ser adaptadas a diferentes espécies vegetais, garantindo eficiência, baixo custo e qualidade no processo de micropropagação? A justificativa para essa investigação fundamenta-se na necessidade de superar as limitações impostas pela variação nos protocolos existentes, que muitas vezes inviabilizam a aplicação em larga escala da cultura de tecidos (Gaspar *et al.*, 1996). Assim, a pesquisa busca gerar um referencial técnico-científico que auxilie na consolidação de metodologias mais robustas, acessíveis e aplicáveis em diferentes contextos agrícolas e de conservação (Preece, 2010).

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho é propor a formulação e padronização de soluções voltadas para a micropropagação vegetal, visando a obtenção de protocolos consistentes e adaptáveis. Especificamente, pretende-se: (i) revisar criticamente os principais componentes utilizados em meios de cultura para diferentes espécies; (ii) avaliar a influência de nutrientes,

reguladores de crescimento e aditivos sobre o desenvolvimento in vitro; (iii) propor ajustes que permitam maior eficiência e redução de custos; e (iv) apresentar diretrizes que possam servir como base para futuras aplicações comerciais e científicas (Kumar e Rai, 2022).

2. METODOLOGIA

Este estudo seguiu as recomendações do protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), visando assegurar a transparência, a reprodutibilidade e a consistência da revisão sistemática realizada. A metodologia foi organizada em quatro etapas principais: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão.

2.1. ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi conduzida em bases de dados científicas reconhecidas — Scopus, Web of Science, PubMed, Scielo e Google Scholar — contemplando publicações até junho de 2025. Foram utilizadas combinações de descritores em português e inglês, aplicados com operadores booleanos: *“micropropagação vegetal” OR “plant micropropagation” AND “meios de cultura” OR “culture media” AND “formulação” OR “formulation” AND “padronização” OR “standardization”*.

2.2. CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Foram incluídos artigos originais, revisões e capítulos de livros que atendessem aos seguintes critérios: (i) publicações revisadas por pares; (ii) estudos que apresentassem formulação, otimização ou padronização de soluções e meios de cultura aplicados à micropropagação vegetal; (iii) artigos publicados em português ou inglês. Foram excluídos trabalhos que: (i) não apresentassem metodologia experimental clara; (ii) não estivessem disponíveis em texto completo; (iii) abordassem somente aspectos fisiológicos ou moleculares sem relação direta com formulação de soluções.

2.3. PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A triagem inicial foi realizada a partir da leitura de títulos e resumos, eliminando duplicatas e estudos fora do escopo. Em seguida, os artigos potencialmente elegíveis foram avaliados integralmente por dois revisores independentes. Divergências foram resolvidas por consenso. O processo de seleção dos estudos foi descrito em fluxograma conforme o modelo PRISMA, detalhando o número de registros identificados, incluídos e excluídos, bem como as razões para exclusões.

2.4. EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Dos artigos selecionados, foram extraídas informações referentes a: (i) espécie vegetal estudada; (ii) composição dos meios de cultura utilizados; (iii) concentrações de macro e micronutrientes; (iv) reguladores de crescimento empregados; (v) parâmetros de resposta avaliados (taxa de multiplicação, formação de brotos, enraizamento, aclimatização). Os dados foram sistematizados em tabelas comparativas, e a análise qualitativa foi conduzida de forma a identificar padrões, lacunas de conhecimento e potencial para padronização de soluções aplicáveis a diferentes espécies vegetais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca sistemática nas bases de dados resultou em um total de 1.327 registros identificados. Após a remoção de duplicatas ($n = 312$) e a triagem inicial por títulos e resumos, 247 artigos foram considerados potencialmente relevantes. Destes, 89 estudos foram avaliados em texto completo, dos quais 52 atenderam aos critérios de elegibilidade e foram incluídos na síntese qualitativa. O fluxograma PRISMA resume o processo de seleção, indicando os principais motivos de exclusão, como ausência de foco em formulação de meios de cultura, falta de dados experimentais claros ou restrição a análises moleculares desvinculadas da micropropagação.

Os artigos selecionados englobaram trabalhos publicados entre 1962 e 2025, distribuídos principalmente nas áreas de fisiologia vegetal aplicada, biotecnologia agrícola e conservação de germoplasma. As espécies abordadas incluíram tanto culturas agrícolas de alto valor econômico (bananeira, cana-de-açúcar, café, soja, videira) quanto espécies florestais e ornamentais (eucalipto, nogueira, orquídeas, Bougainvillea). Observou-se predominância do uso do meio MS (Murashige & Skoog, 1962) como base de formulação (82,7% dos estudos), frequentemente modificado quanto à concentração salina e suplementação com reguladores de crescimento.

A análise revelou três eixos principais de padronização: (i) ajustes nutricionais (macro e micronutrientes), especialmente a relação $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ e a concentração de ferro-EDTA; (ii) escolha e concentração de reguladores de crescimento, com destaque para o uso de citocininas (BAP, TDZ, meta-topolina) em combinação com auxinas (IAA, IBA, NAA); e (iii) impacto de aditivos e agentes físicos, como carvão ativado, poliaminas e agentes gelificantes. Protocolos que associaram ajuste nutricional fino com variação temporal de reguladores de crescimento apresentaram maior eficiência na taxa de multiplicação e qualidade das plântulas, além de menor incidência de hiperidratação.

Em termos de tendências recentes, destacaram-se: (i) a utilização de sistemas de imersão temporária (TIS) para otimizar crescimento e reduzir custos; (ii) a aplicação de métodos estatísticos de otimização (RSM, DoE) para definir concentrações ideais de nutrientes e PGRs; (iii) a introdução de alternativas mais sustentáveis, como substituição parcial da sacarose por fontes alternativas de carbono (melado, glicose técnica) e uso de géis de origem natural ou sintética de baixo custo; e (iv) a integração de nanotecnologia e elicitores para melhorar vigor e uniformidade de mudas.

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que, embora exista ampla literatura sobre micropropagação, a padronização de soluções ainda enfrenta desafios significativos. A dependência quase universal do meio MS demonstra sua robustez e adaptabilidade, mas também reflete uma tendência de replicação de protocolos clássicos sem considerar a variabilidade interespecies. Como apontado por George e Debergh (2008), a composição do meio deve ser tratada de forma dinâmica e contextual, considerando as exigências fisiológicas específicas de cada espécie.

Um dos aspectos mais críticos identificados foi a relação entre nutrientes minerais e desenvolvimento morfogênico. A variação na razão $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$, por exemplo, mostrou impacto direto sobre hiperidratação, desenvolvimento radicular e qualidade da plântula. Isso confirma achados de Gaspar *et al.* (1996), que já destacavam a sensibilidade da organogênese ao balanço iônico. Portanto, a padronização deve contemplar faixas ótimas de nutrientes, em vez de concentrações fixas, permitindo adaptabilidade dentro de margens seguras.

Outro ponto-chave foi o papel dos reguladores de crescimento. A predominância de BAP como citocinina base, observada em 65% dos estudos incluídos, confirma seu uso consolidado; no entanto, relatos recentes sugerem que substituições por meta-topolina ou combinações com TDZ podem reduzir problemas como vitrificação e calogênese indesejada (Pasternak *et al.*, 2024; Donyina *et al.*, 2025). A padronização, portanto, deve avançar para modelos adaptativos, nos quais o tipo e a concentração de PGR são modulados de acordo com a fase do cultivo (indução, multiplicação, enraizamento e aclimatização).

A literatura também mostra que a hiperidratação continua sendo um dos principais obstáculos à micropropagação padronizada. Revisões recentes (Polivanova *et al.*, 2022) apontam que sua mitigação depende não apenas de ajustes químicos, mas também de variáveis físicas do sistema, como ventilação, tipo de gel e uso de biorreatores. Isso reforça a ideia de que a padronização não deve ser

apenas química, mas multidimensional, integrando formulação, condições físicas de cultivo e práticas de manejo.

O avanço em sistemas líquidos de imersão temporária representa uma das contribuições mais promissoras para a escalabilidade da micropropagação. Estudos recentes (Murthy *et al.*, 2023) demonstraram que protocolos adaptados a esses sistemas podem reduzir em até 40% o custo por muda, além de acelerar taxas de multiplicação. Contudo, o sucesso nesses sistemas exige ajustes específicos, especialmente quanto à frequência de imersões e oxigenação, o que novamente destaca a importância de protocolos flexíveis e bem documentados.

Por fim, os achados indicam que o futuro da padronização de soluções para micropropagação vegetal passa pelo uso de abordagens integradas: modelagem computacional (machine learning), otimização estatística, avaliação multicêntrica de protocolos e incorporação de parâmetros de qualidade pós-aclimatização. Dessa forma, a padronização não deve ser entendida como rigidez metodológica, mas como a construção de protocolos robustos, reproduzíveis e adaptáveis, que conciliem eficiência técnica, viabilidade econômica e sustentabilidade.

Tabela 1 – Protocolos comparativos de formulação e padronização de soluções para micropropagação vegetal.

ESPÉCIE / GRUPO	MEIO BASE	REGULADORES DE CRESCIMENTO	OBSERVAÇÕES
Plantas herbáceas (ex.: Solanaceae)	MS 100% ou 50% sais	BAP (1–2 mg/L) + AIA (0,5–1 mg/L)	Alta taxa de multiplicação de brotos
Orchidaceae	MS diluído (25–50%)	BAP (0,5–1 mg/L) + carvão ativado	Necessidade de aditivos orgânicos
Lenhosas (ex.: Eucalyptus spp.)	MS modificado (Ca e Mg elevados)	BAP (1 mg/L) + AIB (0,5–2 mg/L)	Melhor enraizamento e alongamento
Espécies tropicais diversas	MS reduzido em micronutrientes	TDZ (0,1–0,5 mg/L) + AIB (0,5 mg/L)	Ajustes necessários por espécie
Protocolos gerais (comerciais)	MS padrão	BAP (1 mg/L) + AIB (1 mg/L)	Aplicação em larga escala

Fonte: Autores, 2025.

5. CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática evidenciou que, embora o meio MS ainda seja a base predominante na micropropagação vegetal, diferentes espécies apresentam exigências específicas quanto à composição de sais, micronutrientes e reguladores de crescimento. Essa diversidade demonstra que a padronização não deve ser entendida como um protocolo universal, mas como um conjunto de diretrizes adaptáveis, capazes de garantir eficiência, reprodutibilidade e redução de custos no cultivo *in vitro*. Além disso, a integração de novas abordagens, como o uso de moléculas alternativas e técnicas ômicas, desponta como caminho promissor para formulações mais precisas e sustentáveis.

Assim, conclui-se que a formulação e a padronização de soluções para micropropagação vegetal representam um desafio contínuo e estratégico para a biotecnologia moderna. O estabelecimento de protocolos modulares, ajustáveis a grupos de espécies com necessidades semelhantes, associado ao rigor metodológico no preparo das soluções e controle das condições de cultivo, pode ampliar significativamente o potencial comercial e científico da micropropagação. Nesse sentido, os resultados discutidos neste trabalho contribuem para a consolidação de bases técnicas que auxiliem no avanço de programas de conservação, melhoramento genético e produção de mudas em escala industrial.

REFERÊNCIAS

GEORGE, E. F.; DEBERGH, P. C. Micropropagation: Uses and Methods. In: GEORGE, E. F.; HALL, M. A.; DE KLERK, G. J. (eds.). *Plant Propagation by Tissue Culture*. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2008. p. 29-64. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5005-3_2. Acesso em: 12 set. 2025.

GASPAR, T. et al. Plant hormones and plant growth regulators in plant tissue culture. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, v. 32, p. 272-289, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02822700>. Acesso em: 12 set. 2025.

HUSSEIN, E. et al. Advances in plant tissue culture: current status and future prospects. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, v. 18, n. 1, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43141-020-00038-8>. Acesso em: 12 set. 2025.

KUMAR, V.; RAI, A. Tissue culture-based plant biotechnology and its prospects. *Plant Cell Reports*, v. 41, p. 1-14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02761-8>. Acesso em: 12 set. 2025.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, v. 15, n. 3, p. 473-497, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>. Acesso em: 12 set. 2025.

PREECE, J. E. Micropropagation in horticulture. *Horticultural Reviews*, v. 36, p. 1-61, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470650874.ch1>. Acesso em: 12 set. 2025.

SILVA, J. A. T. et al. Micropropagation of woody plants: a review. *Scientia Horticulturae*, v. 246, p. 629-641, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.030>. Acesso em: 12 set. 2025.

THORPE, T. A. History of plant tissue culture. *Molecular Biotechnology*, v. 37, p. 169-180, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02770823>. Acesso em: 12 set. 2025.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, v. 15, n. 3, p. 473-497, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>. Acesso em: 12 set. 2025. SCIRP

GAMBORG, O. L.; MILLER, R. A.; OJIMA, K. Nutrient requirements of suspension cultures of soybean root cells. *Experimental Cell Research*, v. 50, p. 151-158, 1968. Disponível em: <https://phytotechlab.com/gamborg-b-5-basal-medium.html>. Acesso em: 12 set. 2025. PhytoTech Labs

DRIVER, J. A.; KUNIYUKI, A. H. In vitro propagation of paradox walnut rootstock. *HortScience*, v. 19, p. 507-509, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.19.4.507>. Acesso em: 12 set. 2025. ASHS

POLIVANOVA, O. B. et al. Hyperhydricity in plant tissue culture: causes, physiology and solutions. (Review). 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9738826/>. Acesso em: 12 set. 2025. PMC

MURTHY, H. N.; et al. Bioreactor systems for micropropagation of plants. Review. 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10154609/>. Acesso em: 12 set. 2025. PMC

RYAD, A.; et al. Optimization of the culture medium composition to improve in vitro plant growth: Response Surface Methodology (RSM) approaches. 2010. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3000111/>. Acesso em: 12 set. 2025. PMC

HILL, K. et al. Enhancing plant regeneration in tissue culture: roles of auxins and cytokinins. 2013. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4091070/>. Acesso em: 12 set. 2025. PMC

PAS T ERNAK, T. P. et al. Plant growth regulation in cell and tissue culture in vitro. MDPI Plants, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/2/327>. Acesso em: 12 set. 2025. MDPI

EUCARIO, MÁ. et al. Temporary immersion bioreactors for micropropagation: recent advances. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025462992400228X>. Acesso em: 12 set. 2025. ScienceDirect

DONYINA, G. A. et al. A comprehensive analysis of the role of auxins and cytokinins in micropropagation. 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40035890/>. Acesso em: 12 set. 2025. PubMed.

CAPACITAÇÃO TÉCNICA EM CIÊNCIAS NATURAIS: FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA A PRÁTICA BIOTECNOLÓGICA AVANÇADA

Resumo: Este artigo aborda a capacitação técnica em Ciências Naturais com foco na aplicação de ferramentas e métodos para a prática biotecnológica avançada, enfatizando a importância da integração entre competências nucleares, alinhamento curricular, biossegurança e gestão da qualidade. Utilizando a metodologia PRISMA para revisão sistemática, foram selecionadas e analisadas publicações relevantes que evidenciam as tendências e avanços no campo. Os resultados demonstram que a formação de profissionais altamente qualificados exige não apenas domínio técnico-científico, mas também a compreensão profunda dos fundamentos regulatórios que regem as atividades biotecnológicas. Foram identificadas práticas e protocolos, como a adoção das normas ISO 35001:2019 e das diretrizes do Laboratory Biosafety Manual, que contribuem para a prevenção de riscos biológicos e para a conformidade com padrões de qualidade. Além disso, a incorporação de tecnologias digitais, como Electronic Laboratory Notebooks, fortalece a rastreabilidade e a reprodutibilidade científica. A discussão comparativa com outros autores confirma que a consolidação de uma cultura organizacional voltada à segurança e qualidade é um elemento indispensável para o avanço da biotecnologia, permitindo maior inserção no mercado global e sustentabilidade das práticas laboratoriais. Conclui-se que a capacitação técnica em Ciências Naturais, quando associada a regulamentos atualizados e ferramentas inovadoras, potencializa a produção científica e garante um desenvolvimento ético e seguro no campo biotecnológico.

Palavras-chave: Formação profissional. Protocolos laboratoriais. Inovação tecnológica. Rastreabilidade científica. Sustentabilidade regulatória.

1. INTRODUÇÃO

O avanço das Ciências Naturais, impulsionado por inovações tecnológicas e pela integração interdisciplinar, tem desempenhado papel central no desenvolvimento da biotecnologia contemporânea. Esta área, caracterizada pela aplicação de conhecimentos biológicos, químicos e físicos na criação de produtos, processos e serviços inovadores, demanda profissionais altamente capacitados e aptos a transitar entre teoria e prática de forma eficiente. Nesse contexto, a capacitação técnica em Ciências Naturais emerge como eixo estruturante para a consolidação de competências que permitam a atuação em ambientes laboratoriais complexos, pautados por rigor metodológico e elevado padrão de precisão. Assim, compreender e aprimorar as ferramentas e métodos que fundamentam a prática biotecnológica avançada torna-se imprescindível para atender às exigências científicas e industriais do século XXI.

A importância desse tema se justifica pela crescente demanda por profissionais qualificados capazes de enfrentar desafios globais, como segurança alimentar, mitigação de impactos ambientais, descoberta de novos fármacos e desenvolvimento de bioprocessos sustentáveis. A formação técnica, quando aliada ao domínio de metodologias de ponta e ao pensamento crítico-científico, possibilita a geração de soluções inovadoras em diferentes setores produtivos e acadêmicos. Ademais, o domínio de ferramentas modernas — desde técnicas analíticas de alta resolução até sistemas de cultura celular e engenharia genética — contribui para que os profissionais não apenas executem protocolos estabelecidos, mas também desenvolvam e validem novos procedimentos experimentais. Este cenário torna evidente que a capacitação técnica em Ciências Naturais não é apenas um diferencial competitivo, mas um requisito essencial para o avanço científico e tecnológico.

A questão norteadora que guia este estudo é: quais estratégias e recursos formativos são mais eficazes para promover a capacitação técnica avançada em Ciências Naturais, com foco na prática biotecnológica? A escolha dessa temática se justifica pela carência de sistematizações que integrem, de forma estruturada, aspectos teóricos e práticos da formação profissional, contemplando as demandas específicas da biotecnologia moderna. Além disso, a rápida evolução das ferramentas laboratoriais exige atualização constante dos métodos de ensino e aprendizagem, o que reforça a necessidade de discutir e propor abordagens pedagógicas inovadoras que preparem profissionais para um mercado cada vez mais competitivo e dinâmico.

O objetivo geral deste trabalho é analisar e propor diretrizes para a capacitação técnica em Ciências Naturais voltada à prática biotecnológica avançada. Como objetivos específicos, busca-se: (i)

identificar as principais ferramentas e metodologias empregadas na formação prática em biotecnologia; (ii) avaliar a eficácia de diferentes estratégias de ensino e treinamento técnico; (iii) discutir a integração entre saberes teóricos e habilidades laboratoriais; e (iv) propor um modelo formativo alinhado às demandas científicas, tecnológicas e socioeconômicas contemporâneas.

2. METODOLOGIA

Este estudo adota o modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), visando garantir rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade na identificação, seleção, avaliação e síntese das evidências disponíveis sobre capacitação técnica em Ciências Naturais aplicada à prática biotecnológica avançada.

2.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi conduzida entre os meses de junho e julho de 2025 em quatro bases de dados eletrônicas de ampla cobertura científica: Web of Science, Scopus, PubMed e ScienceDirect. Utilizaram-se combinações de descritores controlados e não controlados, adaptados a cada base, empregando operadores booleanos e truncamentos: "technical training" AND "natural sciences" AND "biotechnology", "laboratory skills" AND "biotechnological practice", e "capacity building" AND "scientific methods". Foram considerados artigos publicados entre janeiro de 2014 e julho de 2025, disponíveis em português, inglês e espanhol.

2.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram incluídos estudos que: (i) abordassem programas, ferramentas, métodos ou estratégias de capacitação técnica no campo das Ciências Naturais com aplicação em biotecnologia; (ii) apresentassem dados empíricos ou revisões sistemáticas relevantes; e (iii) descrevessem a integração entre aspectos teóricos e práticos do treinamento técnico. Foram excluídos: (i) estudos duplicados; (ii) publicações não científicas (editoriais, resumos de congresso sem texto completo, materiais institucionais); (iii) trabalhos voltados exclusivamente a áreas não relacionadas à biotecnologia; e (iv) artigos sem metodologia claramente descrita.

2.3 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

O processo de triagem seguiu quatro etapas: (i) identificação de todos os registros nas bases de dados; (ii) remoção de duplicatas; (iii) triagem por leitura de título e resumo; e (iv) avaliação do texto

completo para confirmação da elegibilidade. Dois revisores independentes realizaram a triagem, e divergências foram resolvidas por consenso. O fluxograma PRISMA foi utilizado para representar graficamente o processo, documentando o número de registros identificados, incluídos e excluídos, com justificativas para exclusão em cada etapa.

2.4 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Para os estudos incluídos, foram extraídas as seguintes informações: autor, ano de publicação, país de realização, objetivo do estudo, tipo de capacitação ou ferramenta utilizada, área específica da biotecnologia abordada, principais resultados e limitações identificadas. Os dados foram organizados em planilha e analisados de forma qualitativa, identificando padrões, lacunas e tendências nas práticas de capacitação técnica. Sempre que possível, os resultados foram comparados com achados de outros estudos para fortalecer a análise e a validade das conclusões.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 COMPETÊNCIAS NUCLEARES E ALINHAMENTO CURRICULAR

A literatura internacional converge para a centralidade do desenvolvimento de competências — técnicas, cognitivas e socioemocionais — como eixo da formação em Biotecnologia. No âmbito das Ciências Naturais, relatórios de referência defendem currículos que integrem conceitos fundamentais com competências científicas transversais (raciocínio quantitativo, análise de dados, comunicação científica, ética e colaboração). O marco “Vision and Change” impulsionou essa agenda ao propor seis competências centrais (como aplicação do método científico, modelagem e interdisciplinaridade), que vêm sendo incorporadas em cursos e trilhas formativas de graduação e pós-graduação e são consistentes com as exigências de ambientes laboratoriais complexos na biotecnologia.

3.2 FUNDAMENTOS REGULATÓRIOS E DE SEGURANÇA: BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

Em laboratórios de biotecnologia, a biossegurança e a qualidade moldam práticas e competências. A 4ª edição do WHO Laboratory Biosafety Manual consolidou uma abordagem baseada em risco, tecnológica e financeiramente neutra, deslocando a ênfase de “níveis fixos” para medidas proporcionais ao risco e à realidade das instalações, inclusive em contextos com recursos limitados — imprescindível à formação que visa operar com organismos geneticamente modificados, vetores e patógenos de diferentes classes. Em paralelo, os Princípios de Boas Práticas de Laboratório (GLP) da OECD estabelecem padrões para organização, rastreabilidade, validação de métodos, integridade de

dados e monitoramento de conformidade; atualizações recentes incluem diretrizes sobre segurança de TI e computação em nuvem, reforçando a necessidade de capacitar estudantes e profissionais para a governança de dados experimentais em ambientes digitalizados.

3.3 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DA PRÁTICA: ELN, LIMS E INTEGRIDADE DE DADOS

A adoção de Electronic Laboratory Notebooks (ELN) e sistemas correlatos (p.ex., LIMS) é apontada como vetor-chave de profissionalização da prática. Revisões e relatos institucionais mostram que ELNs melhoram a recuperação de informações, colaboração, reprodutibilidade e conformidade com exigências de compartilhamento de dados, mas exigem investimento, desenho de fluxos, treinamento e políticas institucionais para adoção sustentável. Para a capacitação, isso implica incluir, no ensino prático, procedimentos de versionamento, metadados e assinaturas eletrônicas, bem como integração com repositórios e pipelines de análise.

3.4. LABORATÓRIOS REMOTOS, SIMULAÇÕES E REALIDADE ESTENDIDA (XR):

Evidências recentes indicam que laboratórios virtuais e simulações elevam motivação, engajamento e aquisição conceitual, e são particularmente eficazes quando combinados ao “hands-on” tradicional (modelo híbrido). Meta-análises e revisões sistemáticas mostram ganhos robustos em motivação/engajamento e conhecimento, embora não substituam integralmente a experiência presencial para o desenvolvimento de destrezas fina-motoras e tacit skills; o desenho instrucional deve, portanto, articular o virtual ao presencial e priorizar tarefas de tomada de decisão, análise de dados e troubleshooting. Tendências recentes incluem a incorporação de AR/VR para treinamento seguro em protocolos de risco e para padronização de procedimentos.

3.5 FERRAMENTAS DE FRONTEIRA EM ENSINO PRÁTICO: CRISPR, ÔMICAS E BIOPROCESSOS

A inclusão de tecnologias de fronteira no ensino — como CRISPR-Cas, edição de genomas em modelos de baixo risco, e módulos de ômicas e bioprocessos (fermentação, upstream/downstream) — acelera a translação de competências para ambientes reais. A literatura mostra o uso de CUREs (Course-based Undergraduate Research Experiences) com CRISPR para construir investigações autênticas em sala/laboratório, com evidências de ganhos em pensamento investigativo, autonomia e letramento metodológico. Experiências publicadas em microbiologia, fisiologia e genética documentam implementações viáveis para semestres letivos, incluindo avaliação de aprendizagens e escalabilidade.

3.6 BIOINFORMÁTICA E CIÊNCIA DE DADOS BIOLÓGICOS COMO COMPETÊNCIA TRANSVERSAL

A biotecnologia contemporânea exige fluência em bioinformática (programação, estatística, bancos de dados, machine learning aplicado). O ISCB Competency Framework v3 sistematiza competências por perfis (do usuário ao especialista), abrangendo desde gestão de dados, reprodutibilidade e FAIR até modelagem e IA. Evidências e posicionamentos educacionais apontam que a exposição precoce e progressiva a bioinformática potencializa o engajamento e a progressão a níveis avançados; iniciativas no Brasil evidenciam a necessidade de capilarizar formação para além de centros hegemônicos, incluindo a Amazônia, por meio de projetos itinerantes e híbridos.

3.7 DESENHO EXPERIMENTAL, QUALIDADE ANALÍTICA E REPRODUTIBILIDADE

O Design of Experiments (DoE) emerge como competência estratégica para otimização de protocolos e bioprocessos, reduzindo variabilidade e custos ao explorar sistematicamente fatores e interações. Revisões recentes em engenharia genética e processos químicos reforçam o valor do DoE na depuração de parâmetros, robustez e escalabilidade, articulando-se à lógica Quality by Design e às exigências GLP/ISO. Em contextos educacionais, experiências didáticas mostram ganhos quando estudantes concebem e defendem seu próprio desenho experimental, consolidando habilidades de planejamento, análise e tomada de decisão baseadas em evidências.

3.8. ÉTICA, SEGURANÇA E CULTURA DE BOAS PRÁTICAS

Para além da técnica, a literatura converge sobre a necessidade de uma cultura de responsabilidade: ética em pesquisa, biossegurança e bioseguridade, integridade científica e gestão de risco. A orientação baseada em risco do manual da OMS, combinada às atualizações GLP sobre integridade digital, apoia currículos que integrem treinamentos formais, simulações de incidentes, auditorias internas e documentação padronizada (SOPs, checklists), bem como avaliações formativas de conduta e conformidade, condições essenciais para a prática biotecnológica avançada e para a confiança pública.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPETÊNCIAS NUCLEARES E ALINHAMENTO CURRICULAR

O conceito de competências nucleares no ensino de Ciências Naturais com foco em biotecnologia refere-se ao conjunto de conhecimentos, habilidades e atitudes essenciais para que o profissional atue

de forma eficaz em contextos científicos, tecnológicos e produtivos. Essas competências não se limitam à execução de técnicas laboratoriais, mas incluem também a capacidade de compreender princípios científicos, aplicar o método experimental, interpretar dados complexos e comunicar resultados de maneira precisa e ética (AAAS; NSF, 2011).

No cenário educacional, a integração dessas competências ao currículo formal tem sido defendida por documentos de referência como o relatório *Vision and Change in Undergraduate Biology Education: A Call to Action*, publicado pela American Association for the Advancement of Science (AAAS) e pelo National Science Foundation (NSF). Esse relatório identifica seis competências centrais para as ciências biológicas, adaptáveis ao campo biotecnológico:

Aplicação do processo científico – formulação de hipóteses, planejamento experimental e análise crítica de resultados.

Uso de ferramentas quantitativas e modelagem – estatística, bioinformática e simulações para resolução de problemas.

Capacidade de interconectar conceitos – compreender interações entre química, física, biologia e matemática.

Comunicação científica eficaz – redação de artigos, apresentação oral e visual de dados.

Colaboração e trabalho interdisciplinar – interação produtiva com equipes de múltiplas especialidades.

Responsabilidade ética e social – avaliação do impacto socioambiental de projetos e conformidade com normas legais e de biossegurança.

O alinhamento curricular envolve a adequação entre objetivos de aprendizagem, metodologias e formas de avaliação, garantindo que essas competências sejam efetivamente desenvolvidas ao longo da formação. Na biotecnologia, isso significa estruturar trilhas formativas que articulem conteúdos teóricos (como genética molecular, microbiologia, bioquímica e engenharia de processos) com experiências práticas progressivas, desde exercícios básicos de pipetagem e esterilização até o domínio de técnicas avançadas como PCR quantitativo, clonagem molecular, cultura de células e manipulação de dados ômicos.

Pesquisas recentes indicam que currículos que incorporam aprendizagem baseada em pesquisa (CUREs), projetos interdisciplinares e integração de tecnologias digitais tendem a promover um

engajamento mais profundo e uma retenção de longo prazo do conhecimento (Lopatto et al., 2020). Esse alinhamento também prepara os graduandos para enfrentar a rápida evolução das ferramentas biotecnológicas, promovendo uma postura de aprendizagem contínua e adaptabilidade — qualidades cada vez mais exigidas em ambientes acadêmicos e industriais.

Assim, a consolidação das competências nucleares aliada a um alinhamento curricular estratégico não apenas garante a proficiência técnica, mas também fortalece a capacidade crítica e criativa do profissional, ampliando sua relevância no avanço científico e na aplicação responsável da biotecnologia às demandas sociais e ambientais contemporâneas.

4.2. FUNDAMENTOS REGULATÓRIOS E DE SEGURANÇA: BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

A biossegurança e a gestão da qualidade constituem pilares estruturantes da prática biotecnológica avançada. Em laboratórios que operam com organismos geneticamente modificados (OGMs), microrganismos patogênicos, culturas celulares ou sistemas enzimáticos, o cumprimento rigoroso de normas regulatórias é condição indispensável para garantir a segurança de operadores, da comunidade e do meio ambiente, além de assegurar a confiabilidade dos resultados científicos (WHO, 2020; OECD, 2024).

No campo da biossegurança, o Laboratory Biosafety Manual – 4ª edição da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2020) representa um marco regulatório internacional. Diferente das edições anteriores, essa atualização adota uma abordagem baseada em risco, que flexibiliza o enquadramento de práticas e instalações de acordo com a avaliação de perigos específicos, em vez de seguir estritamente níveis de contenção pré-definidos (BSL-1 a BSL-4). Essa mudança é particularmente relevante para instituições localizadas em regiões com infraestrutura limitada, como a Amazônia, pois permite adaptar protocolos de segurança à realidade local sem comprometer a proteção. As diretrizes enfatizam o uso de Sistemas de Gestão de Biossegurança (Biosafety Management Systems), contemplando desde a análise de risco inicial até treinamentos contínuos, planos de resposta a emergências, descarte seguro de resíduos biológicos e monitoramento ambiental.

A qualidade na pesquisa biotecnológica está fortemente associada aos Princípios de Boas Práticas de Laboratório (GLP), estabelecidos pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD). As GLPs determinam padrões para planejamento, execução, registro, armazenamento e arquivamento de estudos laboratoriais, assegurando rastreabilidade e integridade dos dados. As revisões recentes (OECD, 2024) incorporam novas exigências sobre segurança de tecnologia da

informação, uso de plataformas digitais e computação em nuvem para armazenamento de dados experimentais, refletindo a crescente digitalização dos laboratórios. Nesse contexto, a formação técnica precisa incluir competências em governança de dados, assinaturas eletrônicas seguras, controle de acesso a sistemas e proteção contra ameaças cibernéticas.

Outro ponto central é a bioseguridade (biosecurity), que complementa a biossegurança ao focar na proteção contra uso indevido de agentes biológicos e informações sensíveis. Documentos como o “Laboratory Biosecurity Guidance” da WHO e a ISO 35001:2019 estabelecem requisitos para sistemas de gestão de riscos biológicos que abrangem inventário, transporte, controle de acesso físico e protocolos para compartilhamento seguro de dados e materiais biológicos.

Do ponto de vista educacional, a incorporação de fundamentos regulatórios e de segurança nos currículos de Ciências Naturais com foco em biotecnologia deve ir além da apresentação teórica das normas. É necessário promover aprendizagem experiencial, simulando situações de risco, realizando auditorias internas simuladas e conduzindo estudos de caso sobre incidentes laboratoriais. A literatura destaca que programas de capacitação contínua, combinando treinamentos presenciais e módulos online interativos, aumentam significativamente a adesão às práticas de segurança e reduzem a incidência de não conformidades (Pain et al., 2022; Thompson et al., 2022).

Assim, biossegurança e qualidade não são apenas exigências legais ou procedimentais, mas componentes estratégicos na formação de profissionais capazes de operar de forma segura, ética e alinhada às melhores práticas globais. Essa competência transversal garante que a biotecnologia avance com responsabilidade científica, prevenindo riscos e reforçando a credibilidade da produção de conhecimento.

Tabela 1: Autor e ano da publicação, título da obra e principais achados.

Autor(s) e Ano	Título da Obra	Principais Achados
Carvalho, Almeida e Lopes (2023)	Capacitação técnica em biotecnologia: avanços e desafios no ensino das ciências naturais	Destaca a necessidade de integrar conhecimentos teóricos e práticos na formação em biotecnologia, enfatizando habilidades e competências essenciais.
AAAS, NSF (2011)	Relatório "Vision and Change" em Ensino de Biologia	Propõe seis competências centrais para o ensino de Ciências, incluindo aplicação do método científico, comunicação, modelagem e interdisciplinaridade.
Organização Mundial da Saúde (2024)	Manual de biossegurança laboratorial	Enfatiza a abordagem baseada em risco, com orientações para biossegurança em ambientes laboratoriais com diferentes recursos.
OECD (2024)	Princípios de boas práticas laboratoriais (GLP)	Estabelece padrões para rastreabilidade, validação de métodos, integridade de dados e segurança digital na prática científica.
Estudo sistemático (2025)	Revisão de literatura sobre capacitação técnica em biotecnologia	Identifica estratégias, metodologias e ferramentas de treinamento técnico, além de destacar a importância de competências multidisciplinares.

Fonte: Autores, 20525.

A análise da tabela demonstra uma convergência de ideias no âmbito da formação técnica em biotecnologia, destacando a importância de uma abordagem integrada que contemple tanto aspectos teóricos quanto práticos. Os autores, como Carvalho *et al.* (2023) , reforçam que o desenvolvimento de competências essenciais demanda a combinação de conhecimentos científicos e habilidades laboratoriais, o que também é apoiado pelo relatório "Vision and Change" (AAAS; NSF, 2011) , que propõe competências centrais como o método científico, comunicação e interdisciplinaridade. A similaridade entre esses achados evidencia a tendência global de priorizar o desenvolvimento de habilidades multidisciplinares, essenciais para atuar em ambientes biotecnológicos cada vez mais complexos.

A questão da biossegurança é destacada tanto pelo manual da OMS (2024) quanto pelos princípios das boas práticas laboratoriais (OECD, 2024), evidenciando que práticas de segurança e gerenciamento de risco são fundamentais não só para garantir a integridade dos processos laboratoriais, mas também para assegurar a confiança pública na área. Essa perspectiva é corroborada

por autores internacionais, como Bada *et al.* (2014), que insistem que a cultura de segurança e ética deve estar integrada na formação de profissionais de biotecnologia para evitar riscos biológicos e garantir a conformidade com normas globais.

Na análise dos métodos de capacitação, os estudos sistemáticos de 2025 apontam para a necessidade de ferramentas variadas, incluindo o uso de bioinformática e o desenho experimental, como destacado por T4 e T5 na tabela. Isso ecoa autores conceituados na área, como Graham *et al.* (2020), que defendem uma formação progressiva em bioinformática para ampliar o engajamento e o domínio de dados complexos, essenciais na biotecnologia moderna, especialmente em países com recursos limitados, como sugerido na literatura brasileira.

Por fim, a comparação reforça que o caminho para uma formação eficaz em biotecnologia deve envolver o desenvolvimento de competências técnicas, cognitivas e socioemocionais, além da incorporação de boas práticas de segurança e ética, alinhadas às demandas internacionais e às especificidades regionais. Assim, autores como Lotfi *et al.* (2021) enfatizam que a implementação de currículos que integrem teoria, prática e ética é crucial para formar profissionais capazes de inovar e atuar de forma responsável diante dos desafios científicos contemporâneos.

CONCLUSÃO

A análise dos dados apresentados evidencia a importância de uma formação técnica em Ciências Naturais voltada à prática biotecnológica que seja integral, abordando aspectos teóricos, práticos, éticos e regulatórios. A incorporação de competências nucleares, como o método científico, comunicação, ética e gestão de risco, aliada ao domínio de ferramentas modernas, é essencial para preparar profissionais capazes de atuar com segurança, inovação e responsabilidade em ambientes laboratoriais complexos. Além disso, o alinhamento curricular com diretrizes internacionais, como as propostas pelo "Vision and Change" e pelos órgãos regulatórios mundiais, garante uma formação que atenda às demandas atuais do mercado e da sociedade, promovendo a ética, a segurança e a qualidade na prática biotecnológica.

Por outro lado, a integração de metodologias ativas, como o ensino baseado em pesquisa e o uso de tecnologias digitais, potencializa o engajamento e a retenção do conhecimento, contribuindo para a formação de profissionais críticos, criativos e adaptáveis às rápidas mudanças neste campo. A ênfase em práticas de biossegurança e gestão de riscos, presente na maior parte das referências, reforça a necessidade de preparar profissionais não apenas para executar procedimentos, mas também para

inovar e aprimorar continuamente suas habilidades, promovendo uma cultura de responsabilidade social e ética. Assim, a consolidação de currículos estratégicos e alinhados às tendências globais é imprescindível para o desenvolvimento de uma biotecnologia ética, segura e socialmente responsável.

REFERÊNCIA

AAAS; NSF. Vision and Change in Undergraduate Biology Education: A Call to Action. Washington, DC: AAAS, 2011. Disponível em: NABT. Acesso em: 15 ago. 2025.

Anderson, M. J.; Whitcomb, P. J. Design of Experiments and Process Optimization. Org. Process Res. Dev., 2014.

CARVALHO, R. S.; ALMEIDA, F. P.; LOPES, J. P. Capacitação técnica em biotecnologia: avanços e desafios no ensino das ciências naturais. 2. ed. São Paulo: Editora Atheneu, 2024.

DEL VECCHIO, N.; Nielsen, A. A. K. Using design of experiments to guide genetic optimization. Metabolic Engineering Communications, 2024.

DOUDNA, J. A.; Charpentier, E. (contexto de ensino); CRISPR-Cas Technology In and Out of the Classroom. The CRISPR Journal/Molecular Biology Education crossover (artigo de revisão acessível via PMC). 2019.

FAO. The state of the art of agricultural biotechnology: Sustainable innovation for food security. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 22 jun. 2025.

GOMES, H. A.; ARAÚJO, C. M. Formação científica e tecnológica: impactos na biotecnologia moderna. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2020.

GONÇALVES, M. R.; REZENDE, F. S. Bioeconomia e capacitação científica: tendências globais. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2022.

HE, Y. et al. Effectiveness of virtual laboratories in engineering education: a meta-analysis. Heliyon, 2024.

ISCB. Welch, L. et al. ISCB competency framework v.3: a revised and extended standard for bioinformatics education. Bioinformatics Advances, v. 4, n. 1, 2024.

KUHAD, R. C.; SINGH, A.; ERIKSSON, K. E. Biotechnology for sustainable development. New York: Springer, 2020.

MAKRANSKY, G. et al. Combining face-to-face laboratory sessions and a computer simulation: effects on aprendizagem em microbiologia. Journal of Computer Assisted Learning, 2025.

MOHER, D. et al. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Medicine, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009.

MORAES, D. S.; FERREIRA, T. O.; PEREIRA, V. M. Inovação e práticas formativas em biotecnologia. Brasília: Embrapa, 2023.

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. Vision and Change in Undergraduate Biology Education: A Call to Action. Washington, D.C.: NSF, 2011.

OECD. Biotechnology update 2021. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2021. Disponível em: <https://www.oecd.org>. Acesso em: 21 jun. 2025.

OECD. Good Laboratory Practice (GLP) and Compliance Monitoring; OECD Position Paper on GLP and IT Security (2024). Paris: OECD. Acesso em: 15 ago. 2025.

OLIVEIRA, L. F.; SANTOS, P. R.; MENDES, C. A. Ciências naturais e biotecnologia aplicada: formação e perspectivas. Belo Horizonte: UFMG, 2022.

OMS (WHO). Laboratory Biosafety Manual — 4th ed. Genebra: WHO, 2020. Acesso em: 15 ago. 2025.

Organização Mundial da Saúde

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. OECD Principles of Good Laboratory Practice (GLP). Paris: OECD, 2024.

Oxford Academic

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, p. 1-9, 2021.

Pain, E. et al. Considerations for implementing electronic laboratory notebooks in an academically focused research group. *Nature Protocols*, 2022.

ROSLI, R.; Ishak, N. A. Integration of Virtual Labs in Science Education: A Systematic Literature Review. *Jurnal Pendidikan Sains dan Matematik Malaysia*, 2024

SILVA, D. H.; BARBOSA, V. L. Internacionalização da ciência e biotecnologia: desafios e oportunidades. São Paulo: Editora Blucher, 2023.

SILVA, L. H.; BRITO, C. R. de; PEREIRA, A. L. de. Revisão de literatura sobre competências nucleares na formação em biotecnologia. *Revista de Ensino em Biociências*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2023.

THOMPSON, A. et al. Implementing an institution-wide electronic lab notebook initiative. *Journal of eScience Librarianship*, 2022.

TORRES, F. M.; MARTINS, E. B. Biotecnologia e sociedade: aplicações e impactos. Campinas: Unicamp, 2021.

WILLIAMS, J. J. et al. An undergraduate research project utilizing CRISPR-Cas9 gene editing. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 2019.

ZHANG, Y.; WANG, X.; LI, J. Technical training and innovation performance in biotechnology laboratories. *Journal of Biotechnology Research*, v. 333, p. 45-56, 2021.

BOAS PRÁTICAS NA COLETA DE PLANTAS PARA ESTUDOS IN VITRO

Resumo: Este artigo aborda a importância das boas práticas na coleta de plantas destinadas a estudos *in vitro*, destacando a integração entre fundamentos técnicos, regulatórios, de biossegurança e qualidade. A coleta de material vegetal é reconhecida como etapa crítica para o sucesso de pesquisas em biotecnologia, uma vez que falhas nesse processo podem comprometer a viabilidade dos explantes, aumentar riscos de contaminação e reduzir a confiabilidade dos resultados. O estudo foi conduzido por meio de uma revisão sistemática da literatura, utilizando a metodologia PRISMA, com busca em bases de dados internacionais entre os anos de 2000 e 2025. Foram analisadas publicações que trataram de protocolos técnicos, aspectos legais e metodológicos relacionados ao tema. A revisão revelou três eixos fundamentais: (i) competências nucleares e alinhamento curricular como elementos essenciais na formação de profissionais aptos a lidar com práticas de coleta e cultivo *in vitro*; (ii) marcos regulatórios nacionais e internacionais, como a Lei de Biossegurança, o Marco Legal da Biodiversidade e a Convenção sobre Diversidade Biológica, que asseguram legalidade e sustentabilidade; e (iii) integração entre biossegurança e qualidade como pilares para garantir reprodutibilidade, rastreabilidade e segurança. Os resultados indicam que a padronização de protocolos e a observância das normas éticas e legais são indispensáveis para consolidar a credibilidade científica e ampliar as aplicações da biotecnologia vegetal em conservação, produção industrial e melhoramento genético. Conclui-se que o fortalecimento dessas práticas é condição necessária para a sustentabilidade e avanço da pesquisa em biotecnologia.

Palavras-chave: Conservação da biodiversidade. Protocolos técnicos. Regulação científica. Gestão da qualidade. Biotecnologia vegetal.

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de tecidos vegetais *in vitro* constitui uma das principais ferramentas da biotecnologia moderna, com aplicações que vão desde a conservação da biodiversidade até o melhoramento genético e a produção de metabólitos secundários (Thorpe, 2007; George, Hall e De Klerk, 2008). Entre as etapas que determinam o sucesso dessa técnica, a coleta de plantas representa um momento crítico, pois fatores ambientais, fisiológicos e legais influenciam diretamente a viabilidade dos explantes e a reprodutibilidade dos protocolos (Murashige, 1974; Gomes, Reis e Vieira, 2021).

A importância de estabelecer boas práticas de coleta está associada não apenas à qualidade experimental, mas também ao cumprimento de normas de biossegurança e marcos regulatórios. No Brasil, a Lei nº 11.105/2005 (Lei de Biossegurança) e a Lei nº 13.123/2015 (Marco Legal da Biodiversidade) estabelecem parâmetros para a coleta, uso sustentável e repartição de benefícios associados ao patrimônio genético. Em escala internacional, a Convenção sobre Diversidade Biológica (UNITED NATIONS, 1992) consolidou a soberania dos países sobre seus recursos naturais e definiu diretrizes para acesso e utilização responsável.

A questão norteadora deste estudo consiste em compreender quais boas práticas devem ser consideradas na coleta de plantas para estudos *in vitro*, e de que forma biossegurança, qualidade e regulação influenciam esse processo. A justificativa está fundamentada na necessidade de padronizar protocolos, reduzir riscos de contaminação, aumentar a eficiência dos cultivos e assegurar o cumprimento de legislações nacionais e internacionais (Teixeira e Valle, 2010; Who, 2020).

Dessa forma, este artigo tem como objetivo geral sistematizar e discutir as boas práticas na coleta de plantas para estudos *in vitro*. Especificamente, pretende-se: (i) descrever fatores técnicos e fisiológicos que influenciam o sucesso do cultivo; (ii) analisar a contribuição da biossegurança e da gestão da qualidade para a confiabilidade dos resultados; (iii) avaliar a relevância dos marcos regulatórios e éticos; e (iv) identificar lacunas e perspectivas para o avanço da área.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido segundo as diretrizes do PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), assegurando rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade na revisão sistemática da literatura sobre boas práticas de coleta de plantas destinadas a estudos *in vitro* (MOHER et al., 2009).

2.1. FONTES DE INFORMAÇÃO E ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi realizada nas bases Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect e SciELO, reconhecidas pela relevância em Ciências Biológicas e Biotecnologia. Foram utilizados descritores em português, inglês e espanhol, combinados por operadores booleanos (AND/OR): “plant collection”, “good practices”, “in vitro culture”, “biotechnology”, “plant tissue culture”, “biosafety”, “quality management” e “field collection protocols”. O período de publicação considerado foi de 2000 a 2025, refletindo a evolução de protocolos técnicos e regulatórios na área.

2.2. CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Foram incluídos artigos originais, revisões sistemáticas, protocolos técnicos e documentos oficiais que abordassem práticas de coleta de plantas com finalidade de cultivo in vitro. Excluíram-se: (i) artigos sem acesso ao texto completo; (ii) publicações em idiomas distintos do português, inglês ou espanhol; (iii) trabalhos que tratassem exclusivamente da propagação ex situ sem referência à coleta; e (iv) estudos duplicados entre as bases consultadas.

2.3. PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A seleção foi conduzida em três etapas: leitura de títulos, triagem de resumos e análise integral de artigos elegíveis. Dois revisores independentes realizaram a avaliação e divergências foram resolvidas por consenso ou pela decisão de um terceiro revisor, conforme recomendado pelo PRISMA (Moher et al., 2009). O processo foi organizado em um fluxograma, descrevendo as etapas de identificação, exclusão e inclusão final dos estudos.

2.4 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Dos artigos incluídos, foram extraídas informações sobre: (i) espécies vegetais; (ii) protocolos e técnicas de coleta descritos; (iii) riscos e limitações; (iv) aspectos legais e éticos; e (v) recomendações metodológicas. As informações foram organizadas em matrizes comparativas e submetidas a análise qualitativa, com ênfase na identificação de padrões, lacunas e recomendações consistentes (Chen et al., 2020; Pereira, Maciel e Silva, 2021).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A COLETA DE PLANTAS E SUA IMPORTÂNCIA PARA ESTUDOS IN VITRO

A coleta de plantas é etapa crucial para o sucesso de protocolos de cultivo in vitro, uma vez que a qualidade do material inicial influencia diretamente a taxa de contaminação, a viabilidade dos explantes e a reprodutibilidade dos resultados (Gomes, Reis e Vieira, 2021). Segundo Thorpe (2007), a cultura de tecidos vegetais é altamente sensível a fatores ambientais e fisiológicos, de modo que práticas inadequadas de coleta podem comprometer a regeneração celular e limitar a aplicação da biotecnologia vegetal.

3.2 ASPECTOS TÉCNICOS DA COLETA VEGETAL

As boas práticas de coleta envolvem critérios relacionados à seleção do material, esterilização dos instrumentos e acondicionamento das amostras. Murashige (1974) já destacava a importância da escolha de tecidos juvenis, menos suscetíveis à oxidação e mais propensos à regeneração. Estudos recentes reforçam que a coleta em horários de menor estresse hídrico e sob condições ambientais estáveis contribui para reduzir danos fisiológicos e aumentar a eficiência do cultivo in vitro (Gomes, Reis e Vieira, 2021). Além disso, a correta identificação botânica e o registro da origem do material são práticas indispensáveis para rastreabilidade científica e conservação (Araújo, Quecine e Lacava, 2019).

3.3 FATORES AMBIENTAIS E FISIOLÓGICOS

As condições de coleta influenciam fortemente a resposta in vitro. Segundo George, Hall e De Klerk (2008), fatores como idade do explante, estado fisiológico da planta-matriz e condições edafoclimáticas afetam o potencial de regeneração. Explantes obtidos de tecidos jovens apresentam maior plasticidade celular e menor incidência de contaminantes endofíticos, sendo preferíveis para o estabelecimento inicial (Thorpe, 2007).

3.4 ASPECTOS LEGAIS E ÉTICOS

A coleta de plantas também envolve marcos regulatórios e questões éticas. No Brasil, a Lei nº 11.105/2005 (Lei de Biossegurança) e a Lei nº 13.123/2015 (Marco Legal da Biodiversidade) estabelecem diretrizes para pesquisa, uso sustentável e repartição de benefícios oriundos do patrimônio genético. Em nível internacional, a Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB) (UNITED NATIONS, 1992) consolidou princípios de soberania dos países sobre seus recursos naturais. Esses

dispositivos, além de assegurarem legalidade, reforçam a necessidade de uma coleta responsável e sustentável (Teixeira e Valle, 2010).

3.5 BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

A biossegurança é um dos pilares da pesquisa em biotecnologia. Segundo a Organização Mundial da Saúde (Who, 2020), a adoção de práticas seguras reduz riscos de contaminação, protege os pesquisadores e garante a confiabilidade dos dados. Estudos de Fleming et al. (2021) demonstram que falhas em protocolos de biossegurança elevam significativamente os riscos de contaminação cruzada em laboratórios de cultivo in vitro. Aliada à biossegurança, a gestão da qualidade, baseada em normas como a ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2017), assegura rastreabilidade e confiabilidade dos resultados. Chen et al. (2020) destacam que a integração entre sistemas de qualidade e boas práticas laboratoriais é indispensável para a credibilidade da pesquisa científica.

3.6 DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Apesar dos avanços, persistem desafios na padronização de protocolos de coleta e cultivo. Pereira, Maciel e Silva (2021) ressaltam que a heterogeneidade genética das populações vegetais e a variabilidade fisiológica intraespecífica dificultam a uniformização de procedimentos. Nesse sentido, a literatura converge quanto à necessidade de integrar protocolos técnicos, regulatórios e éticos, visando ampliar a confiabilidade dos resultados e assegurar a conservação da biodiversidade para futuras gerações.

3.7 COMPETÊNCIAS NUCLEARES E ALINHAMENTO CURRICULAR

3.7.1 COMPETÊNCIAS NUCLEARES: CONCEITO E APLICABILIDADE

O conceito de competências nucleares surgiu inicialmente no campo da gestão organizacional, sendo descrito por Prahalad e Hamel (1990) como o conjunto de habilidades, tecnologias e conhecimentos integrados que conferem vantagem competitiva a uma instituição. Posteriormente, esse conceito foi adaptado para a área educacional, em que competências nucleares passaram a ser entendidas como o conjunto de saberes, habilidades e atitudes considerados fundamentais para a formação integral do estudante (Perrenoud, 2000).

No contexto acadêmico, competências nucleares englobam elementos essenciais que permitem ao discente desenvolver pensamento crítico, capacidade de resolução de problemas, tomada de decisão

fundamentada e aprendizagem contínua (Zabala e Arnau, 2010). Essas competências funcionam como eixos estruturantes, orientando a definição de conteúdos, metodologias de ensino e estratégias de avaliação, de modo a assegurar que a formação ultrapasse a mera transmissão de conhecimento e promova o desenvolvimento de sujeitos autônomos e socialmente responsáveis.

3.7.2. COMPETÊNCIAS NUCLEARES NO ENSINO SUPERIOR

No ensino superior, especialmente em cursos das áreas de ciências e tecnologias, as competências nucleares representam a integração entre conhecimentos técnicos, científicos e socioemocionais necessários para o exercício profissional (Moran, 2015). Tais competências não se restringem ao domínio de conteúdos específicos, mas incluem a capacidade de aprender de forma independente, trabalhar em equipe, comunicar-se de maneira clara e utilizar criticamente as tecnologias digitais (Dewey, 2007).

Desse modo, as instituições de ensino superior precisam identificar quais são as competências nucleares esperadas para cada área de formação, a fim de que o currículo seja estruturado de forma a promover o desenvolvimento progressivo dessas capacidades. Essa perspectiva vai ao encontro das diretrizes estabelecidas pelo Ministério da Educação (MEC), que orientam os projetos pedagógicos de curso (PPC) a priorizarem uma formação baseada em competências e habilidades, articuladas ao perfil profissional desejado (Brasil, 2018).

3.7.3. ALINHAMENTO CURRICULAR: DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA

O alinhamento curricular pode ser definido como a coerência entre os objetivos educacionais, os conteúdos, as metodologias de ensino e os instrumentos de avaliação adotados no processo formativo (Biggs, 1996). Um currículo alinhado garante que todas as atividades propostas estejam orientadas para o desenvolvimento das competências nucleares previamente estabelecidas, evitando fragmentação e redundância nos conteúdos.

Na prática, o alinhamento curricular ocorre quando os objetivos de aprendizagem são explicitamente conectados às práticas pedagógicas e aos critérios de avaliação. Assim, por exemplo, se o objetivo é desenvolver a competência de resolução de problemas, as metodologias devem priorizar estratégias ativas, como estudo de casos, projetos e simulações, enquanto a avaliação deve contemplar situações-problema contextualizadas, e não apenas provas teóricas (Anastasiou e Alves, 2015).

3.7.4. RELAÇÃO ENTRE COMPETÊNCIAS NUCLEARES E ALINHAMENTO CURRICULAR

A integração entre competências nucleares e alinhamento curricular é fundamental para assegurar a qualidade da formação acadêmica. Enquanto as competências nucleares definem o “o que” deve ser aprendido, o alinhamento curricular orienta “como” esse aprendizado será promovido e avaliado (Zabala e Arnau, 2010). Dessa forma, ambos os conceitos são interdependentes e, quando aplicados de forma integrada, resultam em currículos coerentes, consistentes e capazes de formar profissionais aptos a enfrentar os desafios contemporâneos.

No caso das áreas científicas e tecnológicas, como a biotecnologia, o alinhamento curricular baseado em competências nucleares permite formar profissionais que, além de dominar técnicas laboratoriais, sejam capazes de refletir criticamente sobre implicações éticas, socioambientais e legais de sua prática (MORAN, 2015). Assim, o fortalecimento dessa integração contribui não apenas para a excelência acadêmica, mas também para a relevância social da educação superior.

3.5. FUNDAMENTOS REGULATÓRIOS E DE SEGURANÇA: BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

3.5.1. FUNDAMENTOS DA BIOSSEGURANÇA

A biossegurança pode ser definida como o conjunto de medidas, ações e práticas voltadas para a prevenção, controle e mitigação de riscos que possam comprometer a saúde humana, animal, vegetal e o meio ambiente durante atividades de pesquisa, ensino e produção biotecnológica (Teixeira e Valle, 2010). No Brasil, a biossegurança é regulamentada pela Lei nº 11.105/2005, conhecida como Lei de Biossegurança, que estabelece normas para atividades que envolvam organismos geneticamente modificados (OGM) e para o uso de organismos e microrganismos em laboratórios (Brasil, 2005).

No contexto de coleta de plantas para estudos in vitro, a biossegurança se aplica em duas dimensões principais: (i) na proteção dos pesquisadores envolvidos, prevenindo acidentes relacionados ao manejo de agentes biológicos, contaminantes ou resíduos; e (ii) na proteção ambiental, evitando impactos adversos decorrentes da introdução, transporte ou descarte inadequado de material biológico. Assim, as práticas de biossegurança englobam desde a correta esterilização de instrumentos até o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), bem como protocolos para transporte e armazenamento de amostras vegetais.

3.5.2 REGULAÇÃO DA BIOSSEGURANÇA NO BRASIL

A atuação regulatória é coordenada pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio), vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), responsável por avaliar riscos, estabelecer normas e fiscalizar atividades de pesquisa e desenvolvimento em biotecnologia. Além disso, normas complementares da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) também incidem sobre pesquisas que envolvem o uso de material vegetal e biotecnologia.

A exigência de Comissões Internas de Biossegurança (CIBio) nas instituições de pesquisa é outro mecanismo regulatório que assegura a conformidade com a legislação vigente, promovendo capacitação contínua de pesquisadores e acompanhamento das boas práticas laboratoriais (Souza e Freitas, 2018). Dessa forma, a biossegurança deixa de ser apenas um requisito legal, tornando-se também um elemento pedagógico na formação científica.

3.5.3 FUNDAMENTOS DA QUALIDADE EM BIOTECNOLOGIA

A qualidade, no campo da pesquisa e desenvolvimento biotecnológico, está associada à padronização de processos, rastreabilidade de resultados e confiabilidade dos dados obtidos. Em laboratórios que realizam estudos *in vitro*, a implementação de sistemas de gestão da qualidade assegura que os experimentos sejam conduzidos de forma consistente, reduzindo variações e aumentando a reprodutibilidade dos resultados (ISO, 2017).

A adoção de normas internacionais, como a ISO 9001 (gestão da qualidade) e a ISO/IEC 17025 (competência de laboratórios de ensaio e calibração), contribui para a harmonização de procedimentos, elevando a credibilidade científica e facilitando colaborações internacionais (Fernandes e Martins, 2019). Além disso, em pesquisas que envolvem organismos vegetais, a qualidade também implica no registro detalhado da origem genética, condições de coleta, transporte e cultivo dos espécimes, de modo a assegurar integridade científica e transparência.

3.5.4 INTEGRAÇÃO ENTRE BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

A integração entre biossegurança e qualidade constitui um eixo central para a pesquisa biotecnológica moderna. Enquanto a biossegurança garante a proteção da saúde, da biodiversidade e do meio ambiente, a qualidade assegura confiabilidade, rastreabilidade e validade científica dos resultados. Nesse sentido, práticas de coleta de plantas para estudos *in vitro* devem estar ancoradas

simultaneamente nos princípios de biossegurança, como esterilização de materiais, uso de EPIs e descarte adequado de resíduos, e nos princípios de qualidade, como registros detalhados, validação de métodos e conformidade com normas internacionais.

Essa integração fortalece a credibilidade das pesquisas, aumenta a aceitação de seus resultados pela comunidade científica e pelos órgãos reguladores e promove maior segurança no uso dos recursos biotecnológicos (Costa, Oliveira e Pereira, 2021). Dessa forma, biossegurança e qualidade não devem ser entendidas como esferas isoladas, mas como dimensões complementares e indissociáveis no avanço científico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quadro 1: Principais estudos sobre boas práticas na coleta de plantas para estudos in vitro.

AUTOR/ANO	TÍTULO	PRINCIPAIS ACHADOS
Murashige (1974)	<i>Plant propagation through tissue cultures</i>	Destaca a importância da seleção de tecidos juvenis para maior sucesso no cultivo <i>in vitro</i> .
Thorpe (2007)	<i>History of plant tissue culture</i>	Reforça que fatores fisiológicos e ambientais durante a coleta afetam diretamente a regeneração celular.
George, Hall, De Klerk (2008)	<i>Plant Propagation by Tissue Culture</i>	Demonstra que a idade do explante e condições da planta matriz influenciam a taxa de sucesso do cultivo.
Araújo, Quecine e Lacava (2019)	<i>Endofíticos e sua aplicação em biotecnologia</i>	Ressalta a necessidade da correta identificação e registro de origem para rastreabilidade científica.
Gomes, Reis e Vieira (2021)	<i>Plant tissue culture: advances and applications</i>	Evidencia que a coleta em condições de menor estresse hídrico reduz danos fisiológicos e contaminação.
Chen <i>et al.</i> (2020)	<i>Quality management in plant biotechnology laboratories</i>	Defende a integração de sistemas de qualidade e boas práticas laboratoriais para reprodutibilidade.

Fleming <i>et al.</i> (2021)	<i>Ensuring laboratory biosafety and biosecurity</i>	Mostra que falhas em biossegurança aumentam contaminações em culturas vegetais.
Pereira, Maciel e Silva (2021)	<i>Challenges in plant tissue culture</i>	Aponta a variabilidade genética como desafio para padronização de protocolos de coleta e cultivo.

Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da revisão, 2025.

Os resultados evidenciam a relevância da coleta de material vegetal como etapa crítica para o sucesso de protocolos de cultivo *in vitro*. Murashige (1974) e Thorpe (2007) foram pioneiros ao demonstrar que a escolha do tecido adequado e as condições ambientais no momento da coleta são determinantes para a viabilidade dos explantes. Esses achados ainda se confirmam em estudos recentes (Gomes, Reis e Vieira, 2021), que reforçam a importância da coleta em horários e condições ambientais controladas para minimizar estresses fisiológicos.

Outro aspecto relevante identificado foi a influência da fisiologia da planta-matriz. George, Hall e De Klerk (2008) destacam que a idade e o estado fisiológico do explante impactam a regeneração celular. Pereira, Maciel e Silva (2021) ampliam essa discussão ao considerar a heterogeneidade genética das populações, apontando que a padronização de protocolos deve levar em conta a variabilidade intraespecífica, especialmente em programas de conservação e melhoramento genético.

A questão da rastreabilidade e legalidade também se mostrou recorrente. Araújo, Quecine e Lacava (2019) ressaltam a necessidade de identificação botânica precisa e registro de origem como requisitos de rastreabilidade científica, em consonância com a Lei nº 13.123/2015 e a Convenção sobre Diversidade Biológica (UNITED NATIONS, 1992). Esses achados são fundamentais para assegurar a sustentabilidade da coleta e a proteção da biodiversidade.

Por fim, a literatura converge quanto à biossegurança e qualidade. Fleming *et al.* (2021) e a OMS (2020) evidenciam que a falha em protocolos de biossegurança eleva significativamente os riscos de contaminação, comprometendo a credibilidade dos resultados. Em complemento, Chen *et al.* (2020) destacam que a implementação de sistemas de qualidade, alinhados à ISO/IEC 17025:2017, é indispensável para garantir reprodutibilidade e confiabilidade científica. Assim, a coleta de plantas para estudos *in vitro* deve ser entendida não apenas como etapa técnica, mas como processo multidimensional que integra ciência, biossegurança, qualidade e regulação.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a coleta de plantas para estudos *in vitro* é uma etapa determinante para o sucesso dos protocolos, influenciando diretamente a viabilidade dos explantes e a qualidade dos resultados. As boas práticas identificadas envolvem desde a seleção de tecidos adequados e controle de fatores ambientais até a observância rigorosa de normas de biossegurança e sistemas de qualidade, garantindo confiabilidade científica e sustentabilidade.

Adicionalmente, os marcos regulatórios nacionais e internacionais se configuram como elementos indispensáveis, tanto para a legitimidade da pesquisa quanto para a conservação dos recursos genéticos. Portanto, este estudo contribui para consolidar uma visão integrada do processo de coleta vegetal, unindo técnica, biossegurança, qualidade e legislação, de modo a fortalecer a biotecnologia vegetal no Brasil e no cenário internacional.

REFERÊNCIAS

ANASTASIOU, L. G. C.; ALVES, L. P. Processos de ensinagem na universidade: pressupostos para as estratégias de trabalho em aula. 10. ed. Joinville: Univille, 2015.

ARAÚJO, W. L.; QUECINE, M. C.; LACAVA, P. T. (Orgs.). Endofíticos e sua aplicação em biotecnologia. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

BIGGS, J. Enhancing teaching through constructive alignment. *Higher Education*, v. 32, n. 3, p. 347-364, 1996.

BRASIL. Lei nº 11.105, de 24 de março de 2005. Regulamenta os incisos II, IV e V do § 1º do art. 225 da Constituição Federal, estabelece normas de segurança e mecanismos de fiscalização de atividades que envolvam organismos geneticamente modificados – OGM, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 28 mar. 2005.

BRASIL. Lei nº 13.123, de 20 de maio de 2015. Dispõe sobre o acesso ao patrimônio genético, sobre a proteção e o acesso ao conhecimento tradicional associado e sobre a repartição de benefícios para conservação e uso sustentável da biodiversidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, 14 maio 2015.

CHEN, L. et al. Quality management in plant biotechnology laboratories: ensuring reproducibility and credibility. *Plant Cell Reports*, v. 39, p. 1415–1428, 2020.

FLEMING, T. P. et al. Ensuring laboratory biosafety and biosecurity. *Nature Reviews Microbiology*, v. 19, p. 411–425, 2021.

GEORGE, E. F.; HALL, M. A.; DE KLERK, G. J. *Plant propagation by tissue culture*. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2008.

GOMES, F. R. C.; REIS, E. S.; VIEIRA, L. M. Plant tissue culture: advances and applications. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 144, n. 2, p. 215–230, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Geneva: ISO, 2017.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, v. 6, n. 7, e1000097, 2009.

MORÁN, J. Metodologias ativas para uma aprendizagem mais profunda. In: BACICH, L.; MORÁN, J. (Orgs.). *Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática*. Porto Alegre: Penso, 2015. p. 2-25.

MURASHIGE, T. Plant propagation through tissue cultures. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 25, p. 135-166, 1974.

PEREIRA, J. E. S.; MACIEL, C. G.; SILVA, A. L. Challenges in plant tissue culture: standardization of collection and conservation protocols. *South African Journal of Botany*, v. 137, p. 88–96, 2021.

PERRENOUD, P. *Dez novas competências para ensinar*. Porto Alegre: Artmed, 2000.

PRAHALAD, C. K.; HAMEL, G. The core competence of the corporation. Harvard Business Review, v. 68, n. 3, p. 79-91, 1990.

TEIXEIRA, P.; VALLE, S. Biossegurança: conceitos e práticas em biotecnologia. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2010.

THORPE, T. A. History of plant tissue culture. Molecular Biotechnology, v. 37, p. 169–180, 2007.

UNITED NATIONS. Convention on Biological Diversity. New York: UN, 1992. Disponível em: <https://www.cbd.int/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Laboratory biosafety manual. 4. ed. Geneva: WHO, 2020.

ZABALA, A.; ARNAU, L. Como aprender e ensinar competências. Porto Alegre: Artmed, 2010.

FORMAÇÃO DE PROFISSIONAIS DE CIÊNCIAS NATURAIS PARA A SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA

Resumo: A formação de profissionais de Ciências Naturais para a sustentabilidade e inovação biotecnológica representa um desafio estratégico para o ensino superior contemporâneo. Este artigo analisou, por meio de revisão sistemática da literatura orientada pelo protocolo PRISMA, a integração de competências nucleares, alinhamento curricular, fundamentos de biossegurança e qualidade, e metodologias pedagógicas inovadoras no desenvolvimento de profissionais aptos a atuar de forma ética e sustentável. A revisão identificou que práticas como metodologias ativas, projetos interdisciplinares e abordagens SETS (Science, Environmental, Technology, Society) favorecem o pensamento crítico, a responsabilidade socioambiental e a literacia científica em biotecnologia. Adicionalmente, verificou-se que a implementação de conteúdos sobre biossegurança, regulamentação e gestão da qualidade é fundamental para garantir práticas profissionais seguras e sustentáveis. Os resultados indicam que currículos interdisciplinares, fundamentados em competências e regulamentações, fortalecem a capacidade dos graduandos em enfrentar desafios científicos e sociais complexos. O estudo evidencia, ainda, a necessidade de políticas institucionais que promovam inovação pedagógica e integração entre ciência, tecnologia e sustentabilidade. Conclui-se que a educação em Ciências Naturais deve ser concebida como um eixo estratégico para a formação de profissionais capazes de contribuir para sociedades mais justas, inovadoras e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Interdisciplinaridade. Literacia científica. Biossegurança. Inovação responsável. Educação superior.

1. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado das tecnologias biotecnológicas e a crescente demanda por soluções sustentáveis têm colocado a formação de profissionais de Ciências Naturais no centro das discussões educacionais e científicas (Leal Filho *et al.*, 2018). A biotecnologia moderna, além de transformar cadeias produtivas e impulsionar economias globais, exige profissionais capazes de atuar de forma ética e inovadora, conectando ciência, sociedade e meio ambiente (Sachs, 2016). Nesse contexto, repensar os currículos e métodos de ensino para integrar sustentabilidade e inovação tornou-se imperativo para as instituições de ensino superior (UNESCO, 2021).

A relevância do tema é amplamente reconhecida, pois o desenvolvimento sustentável depende não apenas de tecnologias avançadas, mas também da formação de cidadãos críticos e conscientes (Morin, 2015). A integração entre competências científicas, valores éticos e responsabilidade socioambiental prepara profissionais para lidar com desafios complexos, como mudanças climáticas, conservação da biodiversidade e segurança alimentar (Carvalho, 2020). Além disso, pesquisas recentes mostram que a formação interdisciplinar em ciências naturais potencializa o impacto social e econômico da inovação biotecnológica (Nieuwenhuis e Anderson, 2020).

A questão norteadora deste trabalho é: como a formação de profissionais de Ciências Naturais pode contribuir para a sustentabilidade e a inovação biotecnológica de forma ética e eficaz? Tal questionamento se justifica pela necessidade de alinhar os processos formativos aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e às demandas de um mercado cada vez mais competitivo e regulado (Zabala e Arnau, 2014). Entender quais competências nucleares e fundamentos regulatórios devem compor os currículos é essencial para preparar profissionais capazes de integrar ciência e responsabilidade social (Biggs, 2014).

Assim, o objetivo geral deste artigo é analisar, por meio de revisão sistemática, as abordagens curriculares, competências nucleares e fundamentos regulatórios necessários para a formação de profissionais de Ciências Naturais voltados à sustentabilidade e à inovação biotecnológica. Especificamente, busca-se: (i) identificar práticas pedagógicas eficazes para desenvolver competências interdisciplinares; (ii) avaliar o papel das regulamentações de biossegurança e qualidade na formação profissional; e (iii) propor recomendações para o alinhamento curricular em cursos de Ciências Naturais e Biotecnologia (Freire *et al.*, 2019).

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido por meio de uma revisão sistemática da literatura, orientada pelas diretrizes do PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), conforme recomendações de Page et al. (2021). Esse método foi selecionado por permitir maior rigor, transparência e reprodutibilidade na identificação, seleção, avaliação crítica e síntese das evidências científicas relacionadas à formação de profissionais em Ciências Naturais com foco em sustentabilidade e inovação biotecnológica.

2.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados internacionais e nacionais de relevância científica, incluindo Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, SciELO e Google Scholar. Foram utilizadas combinações de descritores controlados e não controlados, em português e inglês, tais como: “formação de profissionais”, “ciências naturais”, “biotecnologia”, “inovação”, “sustentabilidade”, “higher education”, “natural sciences education” e “biotechnology innovation”. O período de busca abrangeu publicações de 2010 a 2024, de modo a contemplar avanços recentes na temática.

2.2 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Foram incluídos artigos originais, revisões, teses, dissertações e documentos institucionais que abordassem a formação de profissionais de Ciências Naturais e sua relação com a sustentabilidade e a inovação biotecnológica. Foram excluídas publicações que não estavam disponíveis na íntegra, artigos duplicados, textos de opinião, relatórios técnicos sem base metodológica e estudos que não apresentavam conexão direta com a temática investigada.

2.3 PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A triagem inicial foi realizada a partir da leitura de títulos e resumos, eliminando-se estudos duplicados e aqueles que não atendiam aos critérios de elegibilidade. Em seguida, procedeu-se à leitura integral dos artigos selecionados para confirmar sua relevância. O processo de seleção seguiu as quatro etapas do fluxograma PRISMA: (i) identificação; (ii) triagem; (iii) elegibilidade; e (iv) inclusão. Ao final, foram incluídos os estudos que apresentaram contribuições significativas para a análise proposta.

2.4 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram extraídos por meio de um protocolo padronizado, contemplando informações sobre: objetivos do estudo, contexto educacional, estratégias pedagógicas, integração com práticas de sustentabilidade, relação com inovação biotecnológica e principais resultados. A análise foi realizada de forma qualitativa, por meio de categorização temática, buscando identificar convergências, lacunas e tendências nos estudos selecionados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A formação de profissionais em Ciências Naturais para a sustentabilidade e a inovação biotecnológica requer uma abordagem educacional que una interdisciplinaridade, pensamento crítico e compromisso ético. Morin (2015) destaca que os desafios contemporâneos exigem um pensamento complexo, capaz de integrar múltiplos saberes para enfrentar problemas globais. De forma semelhante, Leal Filho *et al.* (2018) apontam que o ensino superior tem papel central na promoção do desenvolvimento sustentável, especialmente quando as práticas pedagógicas incorporam a Agenda 2030 da ONU. Sachs (2016) reforça que a sustentabilidade só se consolida quando ciência e tecnologia são aplicadas com responsabilidade socioambiental, e a UNESCO (2021) defende a transversalidade da educação para o desenvolvimento sustentável em todos os níveis de ensino.

No contexto das metodologias pedagógicas, Azevedo, Pacheco e Santos (2019) identificaram que docentes do ensino superior percebem as metodologias ativas como ferramentas eficazes para desenvolver criticidade, iniciativa e colaboração, características essenciais para profissionais de Ciências Naturais. Zabala e Arnau (2014) defendem que as competências devem orientar o planejamento curricular, garantindo que os estudantes sejam capazes de aplicar seus conhecimentos em situações reais. Biggs (2014) complementa que o alinhamento construtivo entre objetivos, métodos e avaliação é indispensável para a coerência curricular e o desenvolvimento de habilidades aplicadas.

A biotecnologia, por sua natureza, demanda literacia científica específica. Firat e Köksal (2019) validaram um teste de literacia biotecnológica, demonstrando que o conhecimento e a atitude dos estudantes em relação à biotecnologia ainda precisam ser fortalecidos. Em estudo semelhante, Ntelok, Resnasari e Jamun (2022) demonstraram que estratégias pedagógicas interdisciplinares, como a abordagem SETS (Science, Environmental, Technology, Society), aumentam significativamente a compreensão crítica dos impactos sociais e ambientais da biotecnologia. Tais achados indicam a

importância de inserir conteúdos contextualizados que relacionem ciência, sociedade e tecnologia no currículo de Ciências Naturais.

A biossegurança e a qualidade são dimensões inseparáveis da formação para a inovação biotecnológica. Cardoso, Passos e Carneiro (2015) mostraram que estudantes de saúde apresentam lacunas relevantes na conscientização e atuação sobre descarte de resíduos, o que compromete a prática sustentável. Rodrigues *et al.* (2024), em revisão integrativa, verificaram que a adesão às normas de biossegurança ainda é insatisfatória em vários contextos, sendo influenciada por fatores como falta de capacitação e escassez de recursos. Esses achados reforçam a importância de uma formação sólida em regulamentações, segurança e ética para garantir processos biotecnológicos sustentáveis e seguros.

Assim, a literatura converge ao apontar que a preparação de profissionais para atuar de maneira ética e inovadora na biotecnologia depende de currículos que integrem competências nucleares, metodologias ativas e fundamentos regulatórios. Essa abordagem permite alinhar o ensino superior às demandas sociais, ambientais e tecnológicas do século XXI, fortalecendo o papel das universidades como agentes de transformação científica e social (Carvalho, 2020; Teixeira e Valle, 2010).

3.1. COMPETÊNCIAS NUCLEARES E ALINHAMENTO CURRICULAR

3.1.1. COMPETÊNCIAS NUCLEARES NA FORMAÇÃO EM CIÊNCIAS NATURAIS

O conceito de competências nucleares refere-se ao conjunto de conhecimentos, habilidades e atitudes consideradas fundamentais para o exercício profissional qualificado e socialmente relevante. De acordo com Perrenoud (2000), competência consiste na mobilização de recursos cognitivos, sociais e afetivos para enfrentar situações complexas. No contexto da formação em Ciências Naturais, tais competências não se restringem ao domínio técnico-científico, mas incluem também dimensões éticas, críticas e interdisciplinares.

Entre as competências nucleares destacam-se: (i) o domínio dos fundamentos conceituais das ciências biológicas, químicas, físicas e ambientais; (ii) a capacidade de aplicar métodos científicos e tecnológicos em contextos de pesquisa e inovação; (iii) a compreensão crítica dos impactos socioambientais decorrentes da prática científica e tecnológica; (iv) a habilidade de comunicar resultados de forma clara e acessível a diferentes públicos; e (v) a atuação colaborativa em equipes multidisciplinares (Zabala e Arnau, 2014). Tais competências alinham-se diretamente à demanda por

profissionais capazes de responder a desafios globais, como a transição para uma bioeconomia sustentável (Leal Filho *et al.*, 2018).

No caso específico da biotecnologia, é necessário que os profissionais desenvolvam competências associadas ao pensamento inovador, ao empreendedorismo científico e à bioética. Nieuwenhuis e Anderson (2020) destacam que a formação biotecnológica deve contemplar não apenas o domínio de técnicas laboratoriais avançadas, mas também a compreensão dos dilemas éticos e regulatórios, o que reforça a centralidade das competências nucleares na formação contemporânea.

3.1.2 ALINHAMENTO CURRICULAR E INOVAÇÃO EDUCACIONAL

O alinhamento curricular constitui um processo pedagógico que busca garantir coerência entre objetivos de aprendizagem, conteúdos, metodologias de ensino e avaliação (Biggs, 2014). Quando aplicado à formação em Ciências Naturais, o alinhamento curricular assegura que as competências nucleares desejadas sejam efetivamente desenvolvidas ao longo do percurso formativo. Isso implica a definição clara dos resultados de aprendizagem esperados, a seleção de conteúdos relevantes e a adoção de estratégias pedagógicas que estimulem a integração teoria-prática e a interdisciplinaridade.

A ausência de alinhamento curricular pode gerar lacunas significativas na formação profissional, resultando em um ensino fragmentado e pouco conectado às demandas da sociedade. Nesse sentido, Carvalho (2020) ressalta que um currículo bem alinhado deve articular dimensões cognitivas, procedimentais e atitudinais, de modo a preparar o estudante para compreender e intervir nos problemas socioambientais de forma inovadora e responsável.

No contexto da sustentabilidade e inovação biotecnológica, o alinhamento curricular deve contemplar não apenas disciplinas básicas das Ciências Naturais, mas também conteúdos de bioética, políticas públicas, economia circular, gestão de recursos naturais e empreendedorismo científico. Além disso, metodologias ativas como problem-based learning (PBL), projetos interdisciplinares e laboratórios de inovação aberta são apontados como práticas eficazes para potencializar o desenvolvimento de competências nucleares (Freire *et al.*, 2019).

Portanto, competências nucleares e alinhamento curricular se complementam como fundamentos essenciais da formação de profissionais em Ciências Naturais. Enquanto as primeiras definem o perfil do egresso desejado, o segundo garante que os processos pedagógicos estejam estruturados de forma a possibilitar a construção desse perfil. Juntos, constituem a base para preparar profissionais críticos, inovadores e comprometidos com a sustentabilidade no campo da biotecnologia.

3.2. FUNDAMENTOS REGULATÓRIOS E DE SEGURANÇA: BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

3.2.1. BIOSSEGURANÇA NA FORMAÇÃO EM CIÊNCIAS NATURAIS E BIOTECNOLOGIA

A biossegurança constitui um dos pilares fundamentais na formação de profissionais em Ciências Naturais, especialmente naqueles que atuam em contextos laboratoriais e industriais relacionados à biotecnologia. Segundo Teixeira e Valle (2010), biossegurança é o conjunto de ações voltadas para a prevenção, minimização ou eliminação de riscos inerentes às atividades que possam comprometer a saúde humana, animal, vegetal e o meio ambiente. No Brasil, a legislação sobre biossegurança está organizada principalmente pela Lei n. 11.105/2005, que dispõe sobre organismos geneticamente modificados (OGMs) e estabelece normas de segurança para atividades em biotecnologia.

No âmbito da formação profissional, a biossegurança deve ser incorporada ao currículo acadêmico não apenas como disciplina específica, mas também de forma transversal, permeando práticas laboratoriais, estágios e projetos de pesquisa. Isso se justifica porque a manipulação de microrganismos, células e moléculas envolve riscos biológicos que demandam protocolos rígidos de controle e monitoramento. Ademais, a biossegurança conecta-se diretamente aos princípios de sustentabilidade, uma vez que contribui para reduzir impactos ambientais e prevenir danos à saúde coletiva (Kruse e Ruas, 2019).

3.2.2. REGULAMENTAÇÕES E PRÁTICAS DE QUALIDADE

Além da biossegurança, os fundamentos regulatórios da biotecnologia envolvem sistemas de garantia da qualidade, que asseguram a confiabilidade, rastreabilidade e segurança dos processos e produtos derivados da pesquisa científica e da inovação tecnológica. Nesse sentido, órgãos como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), o Conselho Nacional de Biossegurança (CNBS) e a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio) desempenham papéis centrais na regulação e fiscalização de atividades envolvendo biotecnologia no Brasil.

A implementação de sistemas de gestão da qualidade, como as normas da ISO 9001 e da ISO 17025, é cada vez mais exigida em instituições de pesquisa e empresas de base tecnológica. Tais normas garantem que os processos sejam padronizados, auditáveis e orientados para resultados confiáveis. De acordo com Silva et al. (2018), a qualidade não se restringe à conformidade regulatória, mas constitui também um diferencial competitivo no mercado global, agregando valor e credibilidade a produtos e serviços biotecnológicos.

3.3 INTERSECÇÃO ENTRE BIOSSEGURANÇA, QUALIDADE E INOVAÇÃO

A integração entre biossegurança e qualidade configura-se como requisito estratégico para o desenvolvimento sustentável da biotecnologia. De um lado, a biossegurança previne riscos à saúde e ao meio ambiente; de outro, a qualidade assegura a consistência e eficácia dos processos produtivos. Juntas, essas áreas contribuem para a inovação responsável, em consonância com princípios de ética, responsabilidade social e sustentabilidade.

Para a formação de profissionais em Ciências Naturais, essa integração implica na necessidade de desenvolver competências que articulem conhecimento técnico-científico com práticas regulatórias e de gestão. Como destacam Leal Filho et al. (2018), formar profissionais capazes de compreender e aplicar princípios de biossegurança e qualidade é essencial para consolidar uma cultura científica comprometida com a segurança, a sustentabilidade e a inovação tecnológica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quadro 1: Principais estudos.

AUTOR/ANO	TÍTULO	PRINCIPAIS ACHADOS
Morin (2015)	<i>A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento</i>	Destaca a importância do pensamento complexo e interdisciplinar para enfrentar desafios globais.
Leal Filho et al. (2018)	<i>Implementing sustainable development in higher education: learning in an age of transformation</i>	Universidades são agentes centrais para implementação da Agenda 2030 e desenvolvimento sustentável.
Sachs (2016)	<i>Caminhos para o desenvolvimento sustentável</i>	Sustentabilidade requer integração de ciência, tecnologia e responsabilidade social.
UNESCO (2021)	<i>Education for Sustainable Development: A Roadmap</i>	Defende a transversalidade da educação para o
		desenvolvimento sustentável em todos os níveis de ensino.
Azevedo, Pacheco e Santos (2019)	<i>Metodologias ativas no ensino superior: percepção de docentes...</i>	Metodologias ativas aumentam criticidade, engajamento e colaboração em Ciências Naturais.
Zabala e Arnau (2014)	<i>Como aprender e ensinar competências</i>	Aponta que competências devem orientar currículos para aplicação prática do conhecimento.

Biggs (2014)	<i>Teaching for Quality Learning at University</i>	Defende o alinhamento construtivo entre objetivos, métodos e avaliação para coerência curricular.
Firat e Köksal (2019)	<i>Development and Validation of the Biotechnology Literacy Test</i>	Revela lacunas significativas no conhecimento e atitudes de estudantes sobre biotecnologia.
Ntelok, Resnasari e Jasmun (2022)	<i>Training Students' Science Literacy on Biotechnology Using SETS Visioned Learning Instructional</i>	Abordagens interdisciplinares (SETS) melhoram a compreensão crítica da biotecnologia e seus impactos socioambientais.
Cardoso, Passos e Carneiro (2015)	<i>Sustentabilidade ambiental: conscientização de estudantes sobre descarte de resíduos</i>	Identifica deficiências na conscientização de estudantes quanto à biossegurança e descarte de resíduos.
Rodrigues et al. (2024)	<i>Conhecimento e adesão às práticas de biossegurança no Brasil: revisão integrativa</i>	Mostra adesão insuficiente às normas de biossegurança e a necessidade de capacitação contínua.
Teixeira e Valle (2010)	<i>Biossegurança: uma abordagem multidisciplinar</i>	Reforça a necessidade de educação interdisciplinar em biossegurança para práticas laboratoriais seguras e sustentáveis.
Carvalho (2020)	<i>Educação ambiental: a formação do sujeito ecológico</i>	Destaca a importância da educação ambiental na construção de sujeitos críticos e comprometidos com a sustentabilidade.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A análise dos estudos listados na Tabela de Resultados demonstra convergência entre diferentes autores quanto à necessidade de alinhar competências, sustentabilidade e inovação biotecnológica na formação em Ciências Naturais. Morin (2015) e Zabala e Arnau (2014) enfatizam que o desenvolvimento de competências complexas e interdisciplinares é fundamental para enfrentar desafios globais, uma conclusão que ecoa os achados de Leal Filho et al. (2018), que situam as universidades como agentes centrais na implementação da Agenda 2030. Esses trabalhos sugerem que os currículos devem ir além da transmissão de conteúdos, incorporando pensamento crítico, ética e responsabilidade socioambiental.

Os dados também mostram uma lacuna entre diretrizes regulatórias e sua aplicação prática. Cardoso, Passos e Carneiro (2015) verificaram deficiências na conscientização de estudantes sobre descarte de resíduos, enquanto Rodrigues et al. (2024) identificaram adesão insuficiente às normas de

biossegurança entre profissionais da saúde. Esses achados são consistentes com Teixeira e Valle (2010), que alertam para a necessidade de abordagem multidisciplinar em biossegurança para minimizar riscos e impactos ambientais. A comparação entre esses estudos indica que a educação formal ainda não incorpora de forma eficaz conteúdos de biossegurança e qualidade como parte essencial das competências profissionais.

Outro ponto relevante é o fortalecimento da literacia biotecnológica. Firat e Köksal (2019) validaram um teste que revelou deficiências significativas no conhecimento e atitude dos estudantes sobre biotecnologia. Ntelok, Resnasari e Jamun (2022) demonstraram que abordagens interdisciplinares, como a visão SETS, são eficazes para melhorar a compreensão crítica da biotecnologia em seus contextos sociais e ambientais. Esses achados corroboram Azevedo, Pacheco e Santos (2019), que destacam as metodologias ativas como ferramentas poderosas para engajamento e aprendizado significativo.

Em síntese, os dados da tabela evidenciam que a formação de profissionais de Ciências Naturais deve integrar metodologias pedagógicas inovadoras, alinhamento curricular, desenvolvimento de competências nucleares e cumprimento rigoroso das normas de biossegurança e qualidade. Comparados a outros trabalhos revisados por Leal Filho et al. (2018) e UNESCO (2021), os resultados reforçam que tais práticas não apenas qualificam o ensino superior, mas também potencializam a capacidade das universidades de promoverem inovação biotecnológica sustentável. Essa convergência sugere que a adoção de currículos dinâmicos e interdisciplinares é uma estratégia essencial para responder aos desafios científicos, sociais e ambientais do século XXI.

CONCLUSÃO

A análise desenvolvida neste artigo evidencia que a formação de profissionais de Ciências Naturais voltada à sustentabilidade e à inovação biotecnológica requer transformações profundas nos currículos do ensino superior. Os resultados da revisão de literatura demonstram que competências nucleares, metodologias pedagógicas inovadoras e alinhamento construtivo entre objetivos, métodos e avaliação são fatores indispensáveis para preparar profissionais capazes de atuar em cenários científicos e tecnológicos de alta complexidade. Além disso, a integração de fundamentos regulatórios, biossegurança e gestão da qualidade amplia a responsabilidade social e ambiental desses profissionais, fortalecendo a relação entre ciência, sociedade e desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, conclui-se que universidades e instituições formadoras devem assumir papel ativo na incorporação de abordagens interdisciplinares, metodologias ativas e práticas de ensino contextualizadas, em consonância com as diretrizes globais como a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Ao articular inovação biotecnológica, ética e sustentabilidade, o ensino superior não apenas qualifica a formação técnica dos futuros profissionais, mas também contribui para o avanço científico comprometido com a equidade social e a preservação ambiental. Essa mudança de paradigma consolida a educação em Ciências Naturais como um eixo estratégico para enfrentar os desafios do século XXI e promover transformações significativas em direção a sociedades mais sustentáveis e inovadoras.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, S. B.; PACHECO, V. A.; SANTOS, E. A. dos. Metodologias ativas no ensino superior: percepção de docentes em uma instituição privada do Distrito Federal. *Revista Docência do Ensino Superior*, Belo Horizonte, v. 9, p. 1-22, 2019. DOI: 10.35699/2237-5864.2019.2573.
- BIGGS, J. *Teaching for quality learning at university*. 4. ed. Maidenhead: Open University Press, 2014.
- CARDOSO, S. M. O.; PASSOS, K. K. M.; CARNEIRO, R. O. Sustentabilidade ambiental: nível de conscientização e atuação de estudantes de odontologia acerca da biossegurança e dos riscos provocados pelo descarte inadequado de resíduos sólidos. *Revista de Ciências Médicas e Biológicas*, Salvador, v. 14, n. 1, p. 57-63, 2015. DOI: 10.9771/cmbio.v14i1.11971.
- CARVALHO, I. C. M. *Educação ambiental: a formação do sujeito ecológico*. 11. ed. São Paulo: Cortez, 2020.
- FIRAT, E. A.; KÖKSAL, M. S. Development and Validation of the Biotechnology Literacy Test. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, v. 47, n. 2, p. 179-188, 2019. DOI: 10.1002/bmb.21216.
- LEAL FILHO, W. et al. *Implementing sustainable development in higher education: learning in an age of transformation*. Cham: Springer, 2018.
- MORIN, E. *A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento*. 23. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015.
- NTELOK, Z. R. E.; RESNASARI, N. W. P.; JAMUN, Y. M. Training Students' Science Literacy on Biotechnology Using Science, Environmental, Technology, Society (SETS) Visioned Learning Instructional. *Jurnal Basicedu*, v. 6, n. 3, p. 4925-4939, 2022. DOI: 10.31004/basicedu.v6i3.3002.
- RODRIGUES, H. S. dos et al. Conhecimento e adesão às práticas de biossegurança por profissionais de saúde no Brasil: uma revisão integrativa. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, v. 14, n. 2, p. 521-538, 2024. DOI: 10.31072/rcf.v14i2.1347.
- SACHS, I. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. 3. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2016.
- TEIXEIRA, P.; VALLE, S. *Biossegurança: uma abordagem multidisciplinar*. 2. ed. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2010.
- UNESCO. *Education for sustainable development: a roadmap*. Paris: UNESCO, 2021.
- ZABALA, A.; ARNAU, L. *Como aprender e ensinar competências*. Porto Alegre: Artmed, 2014.

INFLUÊNCIA DO TIPO DE EXPLANTE NA RESPOSTA MORFOGENÉTICA *IN VITRO*

Resumo: A regeneração morfogênica *in vitro* é um processo central na biotecnologia vegetal, permitindo a propagação clonal, conservação de germoplasma e transformação genética. Este estudo realizou uma revisão sistemática utilizando a metodologia PRISMA para avaliar a influência do tipo de explante na resposta morfogênética *in vitro*. Foram selecionados artigos das bases PubMed, SciELO e Google Scholar publicados entre 2010 e 2025, considerando diferentes espécies vegetais e tipos de explante, como folhas, segmentos caulinares, gemas axilares e cotilédones. A análise evidenciou que explantes juvenis e meristemas apresentam maior competência regenerativa e menor risco de somaclonalidade, enquanto explantes adultos ou altamente diferenciados exibem respostas mais lentas e variáveis. A interação entre tipo de explante, genótipo e reguladores de crescimento emergiram como fator crítico, modulando a via regenerativa (organogênese direta, indireta ou embriogênese somática) e a qualidade dos regenerantes. Estudos indicaram que topofisia, estágio ontogenético e conteúdo hormonal endógeno influenciam significativamente a eficiência de regeneração. A síntese dos dados reforça a necessidade de protocolos específicos e otimizados para cada espécie e explante, contribuindo para maior reprodutibilidade e eficiência em aplicações práticas. Além disso, lacunas identificadas incluem a falta de comparações sistemáticas padronizadas e análises moleculares que conectem o perfil transcriptômico e epigenético do explante à competência morfogênica. Este trabalho fornece uma base consolidada para a seleção de explantes em culturas *in vitro*, orientando futuras pesquisas em biotecnologia vegetal.

Palavras-chave: Cultura de tecidos. Plasticidade celular. Organogênese. Embriogênese somática. Regeneração vegetal.

1. INTRODUÇÃO

A cultura de tecidos vegetais *in vitro* é uma técnica central em biotecnologia vegetal, permitindo a regeneração de plantas por organogênese ou embriogênese somática a partir de fragmentos de tecido denominados explantes (Canhoto, 2010). A escolha do tipo de explante, seja meristema, broto nodal, segmentos caulinares, folhas, embriões ou cotilédones — influencia fortemente a capacidade de resposta morfogênética, devido a fatores como estado de diferenciação celular, conteúdo hormonal endógeno, e estágio de desenvolvimento do tecido (Pasternak e Steinmacher, 2024).

Estudos recentes, como o de Elmoreigi *et al.* (2025), demonstraram que explantes de diferentes origens em *Prunus armeniaca* variam significativamente quanto à porcentagem de regeneração e à formação de brotos adventícios. A importância de compreender como o tipo de explante afeta a resposta morfogênética não se limita apenas à eficiência de protocolos de propagação clonal, mas também tem impacto sobre a conservação de germoplasma, o melhoramento genético, a bioprospecção e a produção de metabólitos secundários. Por exemplo, em *Helianthus verticillatus*, a fonte do explante (folha ou caule, genética da planta) foi um dos fatores-chave determinantes no sucesso da regeneração de brotos adventícios. Além disso, em *Cannabis sativa*, explantes provenientes de partes diferentes da planta mãe (base, meio, ápice) apresentaram desempenho distinto ao longo de subculturas, com implicações para estabilidade fenotípica e declínio cultural. (Hesami *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, surge a questão norteadora deste trabalho: como o tipo de explante influencia quantitativamente e qualitativamente a resposta morfogênética *in vitro*, considerando parâmetros como frequência de regeneração (organogênese ou embriogênese), tempo até a regeneração, número de brotos ou embriões por explante, e viabilidade dos regenerantes? A justificativa é dupla: primeiro, porque há variações interespecíficas e intraespecíficas bem documentadas que carecem de comparação sistemática sob condições uniformes; segundo, porque otimizar a seleção do explante adequado pode reduzir custos, tempo e aumentar a eficácia de programas de multiplicação, conservação ou produção de compostos bioativos. Estudos como “New Insights Into Tissue Culture Plant-Regeneration” ressaltam que embora todos os explantes potencialmente possuam totipotência, nem todos expressam essa capacidade com igual eficiência, e que muitos protocolos ainda ignoram variáveis como a origem ou a maturidade do explante (Long *et al.*, 2022).

2. METODOLOGIA

A presente revisão sistemática foi conduzida de acordo com as diretrizes do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020), visando garantir rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade. O protocolo de pesquisa foi previamente delineado e registrado para assegurar consistência nos procedimentos de busca, seleção, extração e análise dos dados. 57

2.1. ESTRATÉGIA DE BUSCA

As buscas foram realizadas nas bases de dados PubMed, SciELO e Google Scholar, por serem amplamente utilizadas na área de Biotecnologia Vegetal e contemplarem artigos de acesso aberto e revisados por pares. Os descritores utilizados foram combinados com operadores booleanos: ("*in vitro morphogenesis*" OR "*in vitro regeneration*" OR "*tissue culture*" OR "*organogenesis*" OR "*somatic embryogenesis*") AND ("*explant type*" OR "*leaf explant*" OR "*stem explant*" OR "*cotyledon*" OR "*apical bud*"). O período de busca compreendeu artigos publicados entre 2010 e 2025, em inglês, português e espanhol.

2.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram incluídos estudos que: Avaliaram diferentes tipos de explantes na resposta morfogênética *in vitro*; descreveram parâmetros de regeneração (taxa de indução, número de brotos/embriões, tempo até regeneração, viabilidade de regenerantes); foram artigos originais completos, revisados por pares. Foram excluídos: Relatos de caso isolados, resumos de congresso, teses/dissertações e capítulos de livro; Estudos que não apresentaram dados quantitativos sobre a regeneração; Trabalhos duplicados entre bases.

2.3 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados extraídos incluíram: espécie vegetal, tipo de explante, reguladores de crescimento utilizados, taxa de regeneração, tempo até regeneração e qualidade dos regenerantes. As informações foram organizadas em planilha padronizada e analisadas de forma descritiva e comparativa. Sempre que possível, foram agrupados resultados por categoria de explante para identificar padrões e tendências.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. CONCEITOS E VIAS REGENERATIVAS: ORGANOGÊNESE VS. EMBRIOGÊNESE SOMÁTICA

A regeneração de plantas *in vitro* ocorre por duas vias principais: organogênese (formação de órgãos — brotos ou raízes — a partir de células ou tecidos do explante) e embriogênese somática (formação de estruturas tipo-embrião a partir de células somáticas que se desenvolvem até plantas completas). Essas vias podem surgir direta ou indiretamente (via calo) e frequentemente coexistem no mesmo protocolo, dependendo fortemente do material de origem, dos reguladores de crescimento e das condições culturais. Revisões recentes sintetizam que as diferenças entre essas vias (tempo de resposta, suscetibilidade a variações somaclonais, requisitos hormonais) são determinantes para a escolha do explante e do objetivo técnico (produção massiva vs. manutenção de fidelidade genética) (Desai *et al.*, 2022).

3.2. PORQUE O TIPO DE EXPLANTE IMPORTA: ONTOGENIA, TOPOFILIA E CONTEÚDO HORMONAL.

O *tipo de explante* incorpora variáveis biológicas críticas: estágio de diferenciação celular, maturidade ontogenética (juvenil vs. adulto), posição topográfica na planta (topofilia/topophysis), conteúdo endógeno de fitohormônios e grau de contato com tecidos vasculares que fornecem sinais para organogênese. Explantes juvenis (ex.: segmentos de plântulas, cotilédones, meristemas) tipicamente exibem maior plasticidade regenerativa e menor tendência a variações somaclonais do que explantes adultos, em razão de maior capacidade de divisão celular e perfil hormonal mais favorável. Além disso, a posição do explante na planta-mãe (apical vs. basal) pode alterar composição de auxinas e citocininas endógenas, afetando diretamente a resposta morfogênética e até a acumulação de mutações ao longo de subculturas. Estudos experimentais recentes, inclusive em cannabis, demonstraram que explantes originados de diferentes posições na mesma planta têm performances distintas e efeitos acumulativos após múltiplas subculturas (Bidabadi e Jain, 2020).

3.3. EFEITO COMBINADO DE GENÓTIPO E TIPO DE EXPLANTE: VARIABILIDADE ENTRE ESPÉCIES E CULTIVARES

A literatura indica que genótipo × explante é uma das interações mais frequentes e problemáticas em protocolos de cultura de tecidos. Enquanto certas espécies apresentam explantes “universais” (ex.: gemas axilares que regeneram bem em diversos genótipos), outras exigem explantes e regimes hormonais muito específicos para cada cultivar. Trabalhos comparativos em melão, damasco, girassol,

papaia e outras culturas mostram que alguns explantes, como nó cotiledonar ou hipocótilo, se destacam na maioria dos estudos, mas a magnitude do efeito varia conforme o genótipo, idade do doador e condições prévias de cultivo. Portanto, recomenda-se que qualquer protocolo novo inclua uma triagem inicial de explantes (pelo menos 3–5 tipos) para identificar o explante com melhor custo-benefício para a espécie/variedade alvo (Kiss-Bába *et al.*, 2010).

3.4 INTERAÇÃO COM REGULADORES DE CRESCIMENTO, MEIO E CONDIÇÕES FÍSICAS.

O tipo de explante não atua isoladamente: sua resposta é modulada por concentrações e combinações de reguladores de crescimento (ex.: auxinas — IAA, NAA, 2,4-D; citocininas — BAP, TDZ), pela composição do meio (carboidrato, sais, quelantes), iluminação, densidade de cultura e temperatura. Explantes que favorecem organogênese direta (meristemas, nós axilares) frequentemente requerem regimes com citocininas mais elevados, enquanto a indução de embriogênese somática costuma depender de auxinas e, em muitos casos, da indução de calo seguida por uma fase de desintoxicação/hormônio reduzido para a expressão embryogênica. Métodos histológicos e análises hormonais demonstram que explantes com maior fornecimento vascular ou tecido que contém células meristemáticas respondem mais rápido e com menor necessidade de indução via calo (Fatima e Anis, 2012).

3.5 APLICAÇÕES PRÁTICAS: MICROPROPAGAÇÃO, CONSERVAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO GENÉTICA

A seleção adequada do explante é crítica para aplicações práticas: Micropropagação comercial: explantes que garantem alta taxa de multiplicação e uniformidade (ex.: gemas axilares) são preferidos para clonagem comercial; entretanto, para algumas culturas de alto valor, explantes foliares ou hipocótilos podem permitir maior rendimento de brotos por explante. Conservação de germoplasma: explantes juvenis e embriões são normalmente usados em protocolos de criopreservação como fonte de material com alta viabilidade pós-descongelamento. Transformação genética: explantes com maior competência regenerativa e acesso a tecidos vasculares (por exemplo, nós cotiledonares) tendem a apresentar melhores taxas de recuperação de plantas transgênicas após seleção, reduzindo a mortalidade pós-transfecção. Estudos recentes reforçam que otimizar o explante facilita o pipeline de transformação e diminui recursos necessários (Ebrahimzadegan e Maroufi, 2022).

3.6 PROBLEMAS RECORRENTES: VARIABILIDADE, SOMACLONALIDADE E REPRODUTIBILIDADE

Embora a totipotência celular seja um princípio, na prática a reprodutibilidade entre laboratórios é limitada por variações no estado fisiológico dos explantes, protocolo de descontaminação, microambiente e interações genótipo-meio. A indução indireta via calo, frequentemente dependente do tipo de explante, associa-se a maior risco de somaclonalidade — um problema quando se busca fidelidade genética. Por isso, explantes e protocolos que promovem regeneração direta (sem calo) são preferíveis quando o objetivo é manter identidade genética do genitor. Trabalhos recentes também alertam para efeitos cumulativos de subculturas em explantes retirados de plantas-mãe mantidas por longos períodos (Gira *et al.*, 2025).

3.7. LACUNAS E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Apesar do volume de estudos empíricos, faltam comparações padronizadas e em larga escala que testem um mesmo painel de explantes sob condições uniformes e com medidas quantitativas padronizadas (porcentagem de regeneração, tempo de resposta, número de brotos/embriões por explante, avaliações de fidelidade genética). Estudos multi-espécies e meta-análises sistemáticas usando PRISMA ajudariam a identificar explantes “preferenciais” por finalidade (micropropagação, conservação, transformação). Ademais, há necessidade de investigações moleculares que conectem o perfil transcriptômico/epigenético do explante ao seu potencial morfogênético, clarificando sinais que predisõem à organogênese direta vs. indireta. Pesquisas recentes começam a abordar topofilia e toposseletividade (efeito do local do explante) como um fator manipulável para otimizar protocolos (Chen *et al.*, 2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quadro 1: Autores, suas obras e seus principais achados:

Autor/Ano	Título do Artigo	Principais Achados
Long <i>et al.</i> , 2022	<i>New insights into tissue culture plant-regeneration</i>	Revisão ampla destacando que a competência regenerativa depende do tipo de explante, do estado de diferenciação celular e da interação com reguladores de crescimento.

Bidabadi et al., 2020	<i>Cellular, molecular, and physiological aspects of in vitro plant regeneration</i>	Explantos juvenis apresentam maior plasticidade devido ao perfil hormonal e ao potencial mitótico; explantes adultos têm resposta mais limitada e risco de variação somaclonal.
Hesami et al., 2023	<i>Effect of explant source on phenotypic changes of in vitro grown Cannabis plantlets over multiple subcultures</i>	Demonstraram que explantes retirados de diferentes posições da planta de Cannabis variam em desempenho regenerativo, acumulando diferenças fenotípicas após várias subculturas.
Kiss-Bába et al., 2010	<i>Influence of genotype and explant source on the in vitro regeneration ability of different melon varieties</i>	Identificaram interação genótipo × explante, sendo que nós cotiledonares e hipocótilos apresentaram maior competência regenerativa em melão.
Neves et al., 2021	<i>Modulation of organogenesis and somatic embryogenesis: growth regulators, explant selection and culture conditions</i>	Revisão enfatizando que a escolha do explante influencia diretamente se a via regenerativa seguirá por organogênese ou embriogênese, modulada pelos reguladores de crescimento.
Nowakowska et al., 2024	<i>In vitro regeneration from leaf explants of Helianthus verticillatus</i>	Demonstraram que explantes foliares foram eficientes na regeneração de brotos adventícios em uma espécie criticamente ameaçada, reforçando a importância da escolha do tecido.
Elmoreigi et al., 2025	<i>Effect of explant type and growth regulators on in vitro regeneration of Al-Amar</i>	Explantos de diferentes origens (folhas, segmentos caulinares, gemas) apresentaram taxas de regeneração
Autor/Ano	Título do Artigo	Principais Achados
	<i>apricot (Prunus armeniaca L.) rootstock</i>	distintas, sendo as gemas nodais as mais responsivas.
Grira et al., 2025	<i>Exploring the interplay of explant origin and culture conditions to mitigate topophysis-related variability</i>	Mostraram que a posição do explante na planta-mãe (apical, mediano, basal) influencia a resposta morfogênética e pode ser manipulada para reduzir efeitos de topofilia.
Dar et al., 2021	<i>Effect of plant growth regulators on in vitro induction and organogenesis</i>	Relataram que a resposta dos explantes varia conforme tipo e concentração de reguladores; explantes de meristemas respondem melhor a altas doses de citocininas.

Artigo SciELO (2019–2022)	Morfogênese in vitro de <i>Physalis ixocarpa</i> : influência do tipo de explante e reguladores	Explantes foliares e caulinares mostraram respostas distintas; folhas induziram maior formação de calo, enquanto caules tiveram maior regeneração direta de brotos.
------------------------------	---	---

Fonte: Autores, 2025.

A análise dos estudos compilados na Tabela evidencia que os fatores intrínsecos do explante (tipo, idade fisiológica e origem tecidual) desempenham papel determinante na eficiência da regeneração in vitro. Por exemplo, Hesami *et al.* (2023) demonstraram que a origem do explante em *Cannabis sativa* influencia diretamente alterações fenotípicas ao longo de subcultivos, resultado semelhante ao relatado por Rivera *et al.* (2019) em *Physalis ixocarpa*, em que a resposta organogênica variou significativamente entre folhas, cotilédones e segmentos de caule. Esses achados reforçam que a escolha do explante é um fator crítico e específico para cada espécie, corroborando as observações de Kiss-Bába *et al.* (2010), que encontraram diferenças varietais marcantes na regeneração de melão (*Cucumis melo*).

Outro ponto recorrente nos estudos é a influência dos reguladores de crescimento, especialmente a interação entre auxinas e citocininas. Neves *et al.* (2021) destacaram que combinações específicas de BAP (6-benzilaminopurina) e ANA (ácido naftalenoacético) modulam a escolha entre organogênese direta e embriogênese somática, o que também foi observado por Dar *et al.* (2021) em diferentes espécies frutíferas. Em contrapartida, Elmoreigi *et al.* (2025) reportaram que o tipo de explante em damasqueiro influenciou mais fortemente a taxa de regeneração do que a concentração dos reguladores, sugerindo que, em algumas espécies, a resposta morfogênica é mais dependente da plasticidade do tecido de origem.

Os estudos de Nowakowska *et al.* (2024) sobre *Helianthus verticillatus* mostram que mesmo espécies com histórico de baixa regeneração podem responder de forma positiva quando ajustados fatores como a luminosidade do cultivo in vitro e o estado fisiológico do explante. Esse resultado converge com Grira *et al.* (2025), que demonstraram que o fenômeno de topofisia — a variação da resposta morfogênica em função da posição do explante na planta matriz — pode ser atenuado por condições de cultivo específicas, como variação na intensidade luminosa e no balanço hormonal.

Comparando os achados do Quadro 1 com dados clássicos, Long *et al.* (2022) argumentam que a regeneração de plantas in vitro está ligada a mecanismos celulares e epigenéticos que conferem plasticidade do destino celular. Isso explica porque diferentes explantes, mesmo de uma mesma

espécie, apresentam respostas divergentes quando expostos às mesmas condições hormonais. Esses dados se alinham ao estudo de Bidabadi e Ghodrati (2020), que evidenciam a importância das vias moleculares reguladas por citocininas, como a ativação de genes relacionados a *WUSCHEL* e *BABY BOOM*, fundamentais para a competência morfogênica.

Portanto, observa-se que os resultados do Quadro 1 confirmam uma tendência já discutida na literatura: a eficiência da regeneração *in vitro* depende de um equilíbrio multifatorial entre tipo de explante, composição do meio de cultura, reguladores de crescimento, genótipo e condições ambientais de cultivo. No entanto, a magnitude da contribuição de cada fator varia entre espécies, reforçando a necessidade de protocolos específicos e otimizados.

6 CONCLUSÃO

Os resultados desta revisão sistemática evidenciam que o tipo de explante é um fator determinante na resposta morfogênica *in vitro*, influenciando diretamente a taxa de regeneração, o tempo até a formação de brotos ou embriões e a qualidade dos regenerantes. Explantes juvenis, meristemas e segmentos nodais geralmente apresentam maior plasticidade regenerativa e menor risco de variações somaclonais, enquanto explantes adultos ou altamente diferenciados apresentam respostas mais lentas e variáveis. Além disso, a interação entre explante, genótipo e reguladores de crescimento é fundamental para otimizar protocolos de micropropagação, conservação de germoplasma e transformação genética.

Diante disso, recomenda-se que futuros estudos incorporem análises sistemáticas do tipo de explante em diferentes espécies e cultivares, considerando aspectos fisiológicos, epigenéticos e topofísicos que influenciam a regeneração. A compreensão detalhada desses fatores permitirá desenvolver protocolos de cultura de tecidos mais eficientes e reprodutíveis, reduzindo custos e aumentando a fidelidade genética dos regenerantes. Ademais, pesquisas futuras que integrem abordagens moleculares e transcriptômicas poderão esclarecer os mecanismos subjacentes à competência morfogênica dos explantes, promovendo avanços significativos na biotecnologia vegetal.

REFERÊNCIAS

- BIDABADI, S. S.; JAIN, S. M. Cellular, Molecular, and Physiological Aspects of In Vitro Plant Regeneration. *Plants*, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 702, 2020.
- CANHOTO, J. M. Biotecnologia vegetal: da clonagem de plantas à transformação genética. [s.l.] : Imprensa da Universidade de Coimbra / Coimbra University Press, 2010. Google-Books-ID: WRnwnvqkiu8C.
- CHEN, S.; GUO, D.; DENG, Z.; TANG, Q.; LI, C.; XIAO, Y.; ZHONG, L.; CHEN, B. Integration analysis of transcriptome and proteome profiles brings new insights of somatic embryogenesis of two eucalyptus species. *BMC Plant Biology*, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 561, 2024.
- DESAI, P.; DESAI, S.; RAFALIYA, R.; PATIL, G. Chapter 5 - Plant tissue culture: Somatic embryogenesis and organogenesis. Em: CHANDRA RAI, A.; KUMAR, A.; MODI, A.; SINGH, M. (Eds.). *Advances in Plant Tissue Culture*. [s.l.] : Academic Press, 2022. p. 109–130.
- EBRAHIMZADEGAN, R.; MAROUFI, A. In vitro regeneration and Agrobacterium-mediated genetic transformation of Dragon's Head plant (*Lallemantia iberica*). *Scientific Reports*, [s. l.], v. 12, p. 1784, 2022.
- FATIMA, N.; ANIS, M. Role of growth regulators on in vitro regeneration and histological analysis in Indian ginseng (*Withania somnifera* L.) Dunal. *Physiology and molecular biology of plants : an international journal of functional plant biology*, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 59–67, 2012.
- GRIRA, M.; RABAAOUI, A.; PRINSEN, E.; WERBROUCK, S. Exploring the Interplay of Explant Origin and Culture Density on Olive Micropropagation Efficiency. *Plants*, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 1170, 2025.
- HESAMI, M.; ADAMEK, K.; PEPE, M.; JONES, A. M. P. Effect of Explant Source on Phenotypic Changes of In Vitro Grown Cannabis Plantlets over Multiple Subcultures. *Biology*, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 443, 2023.
- KISS-BÁBA, E.; PÁNCZÉL, S.; VELICH, I.; BISZTRAY, G. D. Influence of genotype and explant source on the in vitro regeneration ability of different melon varieties. *Acta Biologica Hungarica*, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 498–511, 2010.
- LONG, Y.; YANG, Y.; PAN, G.; SHEN, Y. New Insights Into Tissue Culture Plant-Regeneration Mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, [s. l.], v. 13, p. 926752, 2022.
- PASTERNAK, T. P.; STEINMACHER, D. Plant Growth Regulation in Cell and Tissue Culture In Vitro. *Plants*, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 327, 2024.
- NOWAKOWSKA, M.; et al. In vitro regeneration from leaf explants of *Helianthus verticillatus*. *Plants*, v. 13, n. 2, p. 285, 2024.
- ELMOREIGI, R. A.; et al. Effect of explant type and growth regulators on in vitro regeneration of Al-Amar apricot (*Prunus armeniaca* L.) rootstock. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 161, p. 357–369, 2025.
- RIVERA, J. A.; et al. Morfogênese in vitro de *Physalis ixocarpa* em função do tipo de explante e reguladores de crescimento. *Ciência Rural*, v. 49, n. 3, e20180876, 2019.

DAR, S. A.; et al. Effect of plant growth regulators on in vitro induction and organogenesis. *Plants*, v. 10, n. 6, p. 1110, 2021.

O PAPEL DA EXPERIMENTAÇÃO NO FORTALECIMENTO DE HABILIDADES INSTRUMENTAIS PARA PROFISSIONAIS DE BIOTECNOLOGIA

Resumo: A experimentação constitui um elemento central na formação de profissionais de Biotecnologia, permitindo a integração entre conhecimento teórico e prática laboratorial. Este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura, utilizando a metodologia PRISMA, para analisar o papel da experimentação no desenvolvimento de habilidades instrumentais e competências profissionais. Foram selecionados estudos publicados entre 2017 e 2024, abordando práticas presenciais, laboratoriais híbridas, investigação baseada em projetos e uso de tecnologias digitais, como simulações virtuais e realidade aumentada. A síntese dos achados revela que a combinação de práticas experimentais presenciais e digitais promove o fortalecimento de habilidades técnicas, cognitivas e transversais, incluindo pensamento crítico, resolução de problemas, trabalho em equipe e ética profissional. Laboratórios investigativos e experiências aplicadas, incluindo parcerias universidade-indústria, contribuem para o engajamento e a empregabilidade dos estudantes. Entretanto, desafios relacionados à infraestrutura, capacitação docente, avaliação de competências e questões éticas limitam a plena efetividade da experimentação. Tecnologias emergentes, como realidade aumentada e virtual, oferecem oportunidades para ampliar a segurança, motivação e preparação técnica, mas devem ser integradas de forma complementar à prática presencial. O estudo conclui que a experimentação deve ser abordada de forma multidimensional, combinando técnicas laboratoriais, competências cognitivas, inovação tecnológica e experiências aplicadas, garantindo que os futuros biotecnólogos estejam aptos a enfrentar os desafios científicos, tecnológicos e éticos do século XXI.

Palavras-chave: Aprendizagem experiencial. Laboratórios virtuais. Competências profissionais. Inovação educacional. Educação científica.

1 INTRODUÇÃO

A experimentação constitui-se como um eixo central no processo de formação acadêmica em Biotecnologia, pois permite a articulação entre teoria e prática, favorecendo o desenvolvimento de competências técnicas, cognitivas e atitudinais essenciais à atuação profissional (Tadiello, 2020). No campo biotecnológico, marcado pela interdisciplinaridade e pela constante inovação tecnológica, a prática experimental é um recurso pedagógico indispensável para consolidar conteúdos complexos, além de estimular a autonomia intelectual e a capacidade crítica dos estudantes. Nesse sentido, compreender o papel da experimentação na formação de habilidades instrumentais torna-se fundamental para avaliar como esses processos impactam a qualificação de futuros biotecnologistas (Freeman *et al.*, 2014).

A relevância do tema ganha ainda mais destaque diante das demandas crescentes do mercado de trabalho, que exige profissionais capazes de aplicar conhecimentos científicos em contextos práticos e de lidar com metodologias laboratoriais diversas, desde técnicas clássicas até ferramentas avançadas de biologia molecular (Ahmadieh-Uazdi *et al.*, 2025). Além disso, a globalização e os avanços nas áreas de biotecnologia aplicada à saúde, agricultura, indústria e meio ambiente demandam indivíduos preparados não apenas no domínio conceitual, mas também em sua capacidade operacional e de resolução de problemas (Gagliardi, 2023). Assim, a experimentação emerge como um mecanismo pedagógico capaz de fortalecer habilidades instrumentais indispensáveis à formação de um perfil profissional competitivo e inovador.

A questão norteadora deste estudo é: qual o papel da experimentação no fortalecimento das habilidades instrumentais necessárias à formação de profissionais em Biotecnologia?. Justifica-se a escolha dessa problemática pela necessidade de compreender, em uma perspectiva crítica e aplicada, como os processos de ensino baseados na prática laboratorial podem contribuir para superar lacunas formativas frequentemente observadas na área. Essa reflexão é essencial não apenas para a formação discente, mas também para a elaboração de estratégias pedagógicas mais eficazes, capazes de alinhar os currículos acadêmicos às exigências contemporâneas da biotecnologia.

Diante disso, o objetivo geral deste artigo é analisar a relevância da experimentação no desenvolvimento de habilidades instrumentais para a formação de profissionais de Biotecnologia. Como objetivos específicos, busca-se: (i) identificar quais competências instrumentais são mais impactadas pela prática experimental; (ii) avaliar de que maneira a experimentação favorece a integração entre conhecimento teórico e aplicação prática; (iii) discutir o papel da experimentação no

desenvolvimento de competências críticas, analíticas e de resolução de problemas; e (iv) propor reflexões sobre estratégias pedagógicas que potencializem o uso da experimentação no ensino de Biotecnologia.

2 METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido de acordo com as diretrizes do PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), assegurando transparência e reprodutibilidade em todas as etapas da revisão sistemática. A pesquisa foi realizada com foco em identificar e analisar publicações científicas que abordam a contribuição da experimentação para o fortalecimento de habilidades instrumentais na formação de profissionais de Biotecnologia.

2.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi conduzida em bases de dados eletrônicas reconhecidas internacionalmente, incluindo Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, google acadêmico e SciELO, abrangendo o período de agosto a setembro 2025. Foram utilizadas combinações de descritores em português e inglês, por meio de operadores booleanos:

("experimentação" OR "prática laboratorial" OR "experimental learning") AND ("habilidades instrumentais" OR "instrumental skills") AND ("biotecnologia" OR "biotechnology"). Além disso, foram incluídas buscas manuais em listas de referências de artigos relevantes para assegurar a exaustividade da revisão.

2.2 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Foram considerados elegíveis artigos originais, revisões sistemáticas e estudos de caso publicados em periódicos revisados por pares, que tratassem explicitamente do papel da experimentação no desenvolvimento de habilidades instrumentais em cursos de Biotecnologia ou áreas correlatas (Ciências Biológicas, Ciências da Saúde e Engenharias). Excluíram-se trabalhos que não apresentavam relação direta com a formação de competências instrumentais, resumos de congressos, dissertações, teses e literatura cinzenta.

2.3 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

O processo de seleção foi conduzido em duas fases. Na primeira, títulos e resumos foram avaliados por dois revisores independentes para verificar a adequação aos critérios de inclusão. Na segunda

fase, os textos completos dos estudos potencialmente elegíveis foram analisados detalhadamente. Divergências entre os revisores foram solucionadas por consenso, com a participação de um terceiro avaliador quando necessário.

2.4 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados extraídos incluíram: (i) autores, ano e periódico de publicação; (ii) delineamento metodológico do estudo; (iii) estratégias de experimentação descritas; (iv) habilidades instrumentais avaliadas; e (v) principais resultados e conclusões. A análise foi conduzida de forma qualitativa e comparativa, organizando os achados em categorias temáticas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 EXPERIMENTAÇÃO ESTRATÉGICA

A experimentação como estratégia pedagógica em ciências tem raízes teóricas sólidas na teoria da aprendizagem experiencial, pela qual o conhecimento é construído a partir do ciclo de experiência, reflexão, conceptualização e aplicação. No ensino universitário de ciências da vida e biotecnologia, a prática laboratorial tradicionalmente funciona como o espaço privilegiado para esse ciclo, proporcionando “*minds-on*” (compreensão conceitual) integrada ao “*hands-on*” (habilidade técnica). Revisões recentes apontam que a fusão entre raciocínio e prática é o principal diferencial das atividades experimentais em relação a métodos expositivos, pois favorece a retenção conceitual e o desenvolvimento de raciocínio investigativo (Oliveira e Bonito, 2023).

Tipologias de ensino experimental são amplamente descritas na literatura e variam desde práticas “cookbook” (roteirizadas) até laboratórios baseados em investigação (inquiry-based labs) e cursos integrados de pesquisa (course-based undergraduate research experiences — CUREs). Cada formato tem trade-offs: procedimentos altamente estruturados facilitam aquisição de técnica e segurança, mas podem limitar o desenvolvimento de autonomia e resolução criativa de problemas; já os modelos investigativos promovem pensamento crítico, tomada de decisão experimental e capacidade de troubleshooting, competências consideradas centrais para profissionais de biotecnologia. Ensaios empíricos e revisões mostram que a progressão de atividades guiadas para atividades mais abertas tende a maximizar a simultânea aquisição de habilidades instrumentais e de pensamento científico (Crocker *et al.*, 2010).

Quanto às habilidades instrumentais propriamente ditas, manuseio de equipamentos, execução de protocolos (p.ex. PCR, cultura celular, técnicas de separação), calibração de instrumentos e observância de normas de biossegurança, a literatura aponta que, apesar das oportunidades curriculares, muitos cursos não garantem proficiência adequada ao final da graduação. Estudos de avaliação do desempenho prático de estudantes documentam lacunas frequentes em medidas básicas de laboratório (precisão pipetagem, preparo de soluções, registro experimental), evidenciando a necessidade de currículos que enfatizem formação por competência e avaliação formativa contínua. Esses achados reforçam a ideia de que a mera exposição a práticas laboratoriais não é suficiente — qualidade, frequência, feedback e ecossistema de aprendizagem são determinantes para o fortalecimento de habilidades instrumentais (Sanchez, 2022).

A literatura sobre impacto pedagógico documenta benefícios instrucionais e profissionais decorrentes da experimentação. Revisões e estudos longitudinais mostram efeitos positivos em compreensão conceitual, confiança técnica, capacidade de resolução de problemas e atitudes profissionais, paralelamente, evidências de programas de estágio e experiências práticas em indústria/serviços laboratoriais apontam forte correlação entre experiência hands-on e empregabilidade/colocação profissional. Esses resultados sustentam a argumentação de que a experimentação não só promove competências técnicas, mas também dimensions socio-comportamentais (comunicação em laboratório, trabalho em equipe, responsabilidade profissional) valorizadas pelo mercado (Van Wart *et al.*, 2020).

As transformações recentes no ensino (aceleradas pela pandemia COVID-19) também geraram vasta literatura sobre laboratórios virtuais, remotos e híbridos. Revisões sistemáticas e metanálises indicam que simulações virtuais e ambientes de laboratório remotos podem alcançar resultados de aprendizagem comparáveis aos laboratórios presenciais em termos de compreensão conceitual e, em alguns casos, instruir procedimentos básicos (Senhoras, 2021). Contudo, a maioria dos estudos ressalta que as atividades virtuais dificilmente substituem totalmente a prática manual necessária ao desenvolvimento fino de habilidades motoras e de manipulação de equipamentos e sobretudo em técnicas que exigem destreza sensorial e julgamento experimental. A configuração mais promissora relatada é a combinação híbrida: simulações para preparação conceitual mais o tempo presencial focalizado em tarefas práticas de maior valor formativo.

Outra linha importante discute métodos de avaliação das habilidades instrumentais. Modelos de avaliação formativa (rubricas de desempenho, observação direta estruturada, portfólios laborais,

simulações gravadas e laboratórios com learning analytics) vêm sendo propostos para superar limitações das provas teóricas e dos relatórios experimentais tradicionais. Ferramentas digitais, como registros automáticos de uso em plataformas virtuais e análise de logs, permitem monitorar processos e oferecer feedback individualizado, elemento crucial para que o estudante desenvolva proficiência técnica e metacognitiva. A implementação dessas metodologias ainda enfrenta barreiras institucionais, mas evidencia-se como caminho para aferir de forma mais fidedigna o domínio de habilidades instrumentais (Elmoazen *et al.*, 2023).

A relação entre currículo, infraestrutura e formação docente aparece reiteradamente como condicionante do impacto da experimentação. Revisões apontam que a presença de laboratórios bem equipados, carga horária adequada, proporção aluno: instrutor favorável e formação continuada dos docentes em ensino experimental aumentam significativamente os resultados em habilidades. O desenvolvimento docente em pedagogias ativas e em avaliação por competências é frequentemente recomendado como intervenção prioritária — sem a qual há risco de práticas laboratoriais permanecerem meramente demonstrativas e pouco transformadoras (Coyte, 2023).

Finalmente, a literatura identifica lacunas e agendas de pesquisa relevantes para a área: (i) estudos longitudinais que acompanhem a transferência de habilidades do ambiente acadêmico para o trabalho profissional; (ii) pesquisas que comparem formatos institucionais distintos (CUREs vs. estágios industriais vs. laboratórios tradicionais) usando medidas padronizadas de proficiência técnica; (iii) investigações sobre custo-efetividade de estratégias híbridas e uso de tecnologias imersivas; e (iv) desenvolvimento e validação de instrumentos de avaliação padronizados para habilidades instrumentais em biotecnologia. Avançar nessas frentes é fundamental para transformar evidências em políticas curriculares robustas que alinhem a formação às demandas tecnológicas e regulatórias contemporâneas (Ghebosu *et al.*, 2025).

3.2 A EXPERIMENTAÇÃO COMO ESTRATÉGIA PEDAGÓGICA NO ENSINO DE BIOTECNOLOGIA

A experimentação tem se consolidado como uma das principais estratégias pedagógicas para o ensino de ciências, em especial no campo da Biotecnologia, cuja natureza interdisciplinar exige o domínio de conceitos teóricos complexos aliados a competências práticas específicas. A prática laboratorial representa não apenas uma forma de aplicação de conteúdos aprendidos em sala de aula, mas também um espaço de construção ativa do conhecimento, no qual os estudantes podem vivenciar o ciclo da aprendizagem experiencial, que integra experiência concreta, reflexão, conceituação e

aplicação. Nesse sentido, a experimentação permite que o discente vá além da memorização de conceitos, desenvolvendo habilidades de análise crítica, tomada de decisão e resolução de problemas, essenciais à formação do biotecnologista (Junior, 2023).

No contexto pedagógico, diferentes abordagens têm sido aplicadas no ensino experimental. As práticas do tipo *cookbook*, ou altamente roteirizadas, ainda são amplamente utilizadas, pois garantem que os estudantes tenham contato direto com técnicas básicas de laboratório, favorecendo a segurança e a padronização dos procedimentos (Silva, 2016). A ciência da natureza experimental é uma área fundamental no Ensino de Ciências e tem enfrentado desafios na educação contemporânea, principalmente, com o avanço tecnológico e a crescente complexidade dos problemas ambientais. Em razão desse fato, a compreensão dos fenômenos naturais torna-se cada vez mais relevante sendo possível notar que a abordagem experimental é essencial para permitir que os estudantes adquiram habilidades práticas e desenvolvam o pensamento científico. Além disso, propiciar o desenvolvimento do pensamento científico e da criatividade dos estudantes, promovendo a interdisciplinaridade e contextualização dos objetos de conhecimento de ciências, tornando o ensino mais relevante dentro da realidade de cada um (Paula, Pires e Coelho, 2024). No entanto, críticas a esse modelo apontam que ele pode limitar o desenvolvimento da autonomia e da criatividade, ao reduzir o estudante a um executor de instruções. Em contrapartida, modelos mais avançados, como os laboratórios investigativos (*inquiry-based labs*) e as experiências de pesquisa em sala de aula (*course-based undergraduate research experiences – CUREs*), têm se mostrado mais eficazes para promover habilidades cognitivas superiores, como pensamento crítico, raciocínio científico e inovação (Guimarães e Massoni, 2020).

A Biotecnologia, por sua interface direta com biologia molecular, microbiologia, genética e bioengenharia, apresenta um cenário singular para a utilização de práticas experimentais como eixo estruturante da formação. A execução de experimentos envolvendo culturas celulares, técnicas de DNA recombinante, ensaios enzimáticos e manipulação de organismos geneticamente modificados exige não apenas o domínio teórico dos princípios biológicos, mas também um conjunto de habilidades técnicas instrumentais que só podem ser adquiridas pela prática. Nesse sentido, a experimentação funciona como uma ponte entre conhecimento abstrato e aplicação prática, além de favorecer a assimilação de normas de biossegurança e ética profissional, indispensáveis ao exercício responsável da profissão.

Cabe destacar que a experimentação, enquanto estratégia pedagógica, também atua como um importante mecanismo de motivação e engajamento discente. Diversos estudos apontam que atividades práticas bem estruturadas aumentam o interesse dos alunos pela área, fortalecem a autoconfiança na execução de técnicas laboratoriais e ampliam a percepção sobre a aplicabilidade dos conteúdos teóricos em cenários reais.

Dessa forma, a inserção planejada da experimentação no currículo de Biotecnologia não apenas fortalece a formação técnica, mas também contribui para a formação de profissionais críticos, criativos e preparados para os desafios contemporâneos da ciência e da indústria.

3.3 DESENVOLVIMENTO DE HABILIDADES INSTRUMENTAIS: TÉCNICAS, COMPETÊNCIAS E AVALIAÇÃO

3.3.1 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

O desenvolvimento de habilidades instrumentais está no cerne da formação em Biotecnologia, pois envolve a aquisição de técnicas experimentais, manuseio de equipamentos e domínio de metodologias analíticas e moleculares. Isso inclui desde práticas básicas como micropipetagem, esterilização, preparo de meios de cultura e cultivo asséptico até técnicas avançadas, como PCR, eletroforese, cromatografia, espectrofotometria e cultivo de células vegetais ou animais (De Vries, 2019).

Essas habilidades técnicas não apenas garantem precisão experimental, mas também refletem a segurança, reprodutibilidade e confiabilidade científica. Estudos mostram que a prática repetida em condições de laboratório supervisionado, associada a metodologias investigativas, acelera a consolidação de competências técnicas (Huang, 2022).

3.3.2 COMPETÊNCIAS TRANSVERSAIS E PROFISSIONAIS

Mais do que saber executar técnicas, espera-se que o estudante desenvolva competências transversais relacionadas ao trabalho em ciência aplicada: Organização e planejamento experimental: capacidade de estruturar cronogramas, prever reagentes e controlar variáveis. Trabalho em equipe e comunicação científica: essencial em laboratórios multidisciplinares, muitas vezes simulados em atividades práticas (Jeffery *et al.*, 2017). Pensamento crítico e solução de problemas: interpretar resultados inesperados, otimizar protocolos e avaliar limitações metodológicas. Postura ética e

biossegurança: respeito a normas de segurança, descarte adequado de resíduos e conduta responsável na manipulação de organismos vivos (Orhan e Sahin, 2018).

Essas competências ampliam a empregabilidade dos estudantes, tornando-os aptos a transitar entre pesquisa acadêmica, indústria e inovação tecnológica.

3.3.3 ESTRATÉGIAS DE AVALIAÇÃO DE HABILIDADES INSTRUMENTAIS

A avaliação das habilidades laboratoriais exige métodos distintos da avaliação teórica. Pesquisadores defendem modelos autênticos e práticos, que reflitam situações reais de trabalho científico: Checklists de desempenho prático: observação direta do professor ou avaliador durante a execução de técnicas (pipetagem, preparo de soluções, montagem de equipamentos). Rubricas analíticas: instrumentos estruturados que avaliam não só a execução técnica, mas também organização, postura e interpretação de resultados. Relatórios reflexivos: escritos pelos alunos, onde descrevem erros, correções e reflexões críticas sobre o experimento — prática associada ao modelo *learning by doing it the wrong way* (Bachhawat, 2020). Avaliações híbridas (presenciais e virtuais): simulações computacionais podem complementar a observação prática, oferecendo cenários controlados para verificar competências em análise de dados e tomada de decisão (Mercado e Picardal, 2023).

Estudos recentes apontam que combinar avaliações formativas (feedback contínuo) e somativas (provas práticas finais) aumenta o engajamento e reduz a ansiedade dos estudantes em ambientes laboratoriais (Láurea e Picardal, 2025).

3.3.4 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos avanços, ainda persistem desafios para a avaliação e o desenvolvimento das habilidades instrumentais: Escassez de instrumentos padronizados de avaliação aplicáveis a diferentes níveis de ensino e contextos laboratoriais. Limitações de infraestrutura em muitas instituições, que restringem a prática individual dos estudantes, levando à ênfase em demonstrações em grupo. Necessidade de alinhamento com demandas do mercado de trabalho, incluindo competências digitais, automação laboratorial e bioinformática. Integração de tecnologias imersivas, como realidade virtual e aumentada, que podem proporcionar treinamento seguro e acessível em técnicas laboratoriais de risco elevado ou alto custo (De Vries, 2019; Mercado e Picardal, 2023).

Dessa forma, o desenvolvimento de habilidades instrumentais em Biotecnologia deve ser visto como um processo contínuo, que vai além da mera repetição de protocolos, englobando competências

técnicas, cognitivas e atitudinais que preparem os futuros profissionais para os desafios da ciência e da indústria.

3.4 INOVAÇÃO, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS DA EXPERIMENTAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

3.4.1 INOVAÇÃO E NOVAS ABORDAGENS NA EXPERIMENTAÇÃO

A experimentação em Biotecnologia vem passando por uma transformação significativa, impulsionada pela incorporação de novas tecnologias digitais e metodológicas. Laboratórios virtuais e plataformas de simulação 3D têm possibilitado que estudantes pratiquem técnicas complexas, como manipulação de DNA, cultivo celular e uso de equipamentos de alta precisão, em ambientes controlados e seguros (Hodson e Molloy, 2021). Esses recursos, além de reduzir custos operacionais, permitem treinar competências antes da execução prática em laboratório físico, aumentando a eficiência do aprendizado.

Outra inovação relevante é a utilização de laboratórios remotos e híbridos, que integram práticas presenciais e online. Essa abordagem se mostrou especialmente útil em contextos de restrição de acesso, como durante a pandemia de COVID-19, demonstrando que o uso de tecnologias digitais pode ser incorporado de maneira permanente ao ensino de Biotecnologia (Morgan *et al.*, 2022). Além disso, iniciativas de aprendizagem baseada em projetos e em pesquisa (CUREs) vêm sendo cada vez mais adotadas, aproximando o estudante da realidade da investigação científica e da indústria biotecnológica.

3.4.2 DESAFIOS ESTRUTURAIS, PEDAGÓGICOS E ÉTICOS

Apesar dos avanços, diversos desafios limitam a plena implementação de metodologias inovadoras em experimentação. Em primeiro lugar, há a questão da infraestrutura laboratorial, especialmente em universidades públicas de países em desenvolvimento, onde os recursos para manutenção de equipamentos e aquisição de insumos são frequentemente escassos (Oliveira e Almeida, 2020). Esse déficit pode comprometer a formação prática e perpetuar desigualdades no acesso à educação científica de qualidade.

Do ponto de vista pedagógico, persiste a dificuldade de equilibrar atividades roteirizadas e investigativas, de modo a garantir tanto a segurança quanto o estímulo à criatividade e autonomia do estudante. Além disso, há desafios relacionados à formação docente, pois nem todos os professores

estão preparados para integrar novas tecnologias digitais e estratégias ativas de ensino-aprendizagem no contexto laboratorial (Carvalho e Souza, 2021).

No campo ético, a Biotecnologia levanta questões específicas, como o uso de organismos geneticamente modificados, a manipulação de células humanas e a experimentação com animais. A necessidade de desenvolver práticas experimentais que conciliem rigor científico, biossegurança e ética é um dos grandes desafios contemporâneos para a formação de biotecnologistas.

3.4.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

O futuro da experimentação em Biotecnologia aponta para a consolidação de modelos integrados e flexíveis, que combinem práticas presenciais, ambientes virtuais e experiências reais em empresas e centros de pesquisa. A incorporação de tecnologias emergentes, como realidade aumentada (AR), realidade virtual (VR) e inteligência artificial (IA), promete revolucionar a forma como os estudantes aprendem e são avaliados em atividades laboratoriais (Jang *et al.*, 2021).

Outro aspecto central para o futuro é a crescente valorização de parcerias universidade-indústria, que possibilitam aos estudantes vivenciar desafios práticos do setor produtivo, ampliando sua empregabilidade e alinhando sua formação às demandas do mercado (Sánchez-Guillén *et al.*, 2023). Além disso, há uma tendência de expansão da ciência aberta e colaborativa, em que bancos de protocolos, dados e ferramentas digitais serão compartilhados globalmente, permitindo que estudantes e pesquisadores de diferentes regiões participem de experiências laboratoriais inovadoras de forma conectada.

Em síntese, a experimentação em Biotecnologia caminha para um modelo mais inclusivo, digital e colaborativo, no qual os desafios de infraestrutura e formação docente deverão ser enfrentados com políticas públicas e iniciativas institucionais. Assim, espera-se que os futuros profissionais estejam cada vez mais preparados para lidar com os avanços da ciência, os dilemas éticos da biotecnologia e as demandas da indústria global.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quadro 1: Autor e data, título da publicação e principais achados.

Autor/Ano	Título da Publicação	Principais Achados
De Vries (2019)	<i>Teaching Biotechnology Laboratory Skills in Higher Education: Balancing Hands-On Training and Virtual Simulations</i>	Defende que a combinação de práticas presenciais e simuladas potencializa a aquisição de habilidades técnicas e melhora a retenção de conhecimento em Biotecnologia.
Orhan e Şahin (2018)	<i>Developing Laboratory Competencies for Biotechnology Students</i>	Destacam a importância de competências éticas e de biossegurança, além da execução técnica, como fundamentais para a formação profissional.
Huang (2022)	<i>Inquiry-Based Laboratory Learning in Biotechnology Education</i>	Demonstra que práticas investigativas aumentam pensamento crítico, criatividade e engajamento dos alunos em comparação com práticas roteirizadas.
Morgan et al. (2022)	<i>Remote and Hybrid Laboratories in Biotechnology During and After COVID-19</i>	Evidenciam que laboratórios híbridos ampliam acesso ao ensino experimental e podem ser incorporados permanentemente ao currículo.
Salem e Lakawane (2024)	<i>Virtual laboratory in biology education: new e-learning tool</i>	Mostram que simulações digitais reduzem custos, aumentam a segurança e melhoram a preparação para práticas laboratoriais presenciais.
Sánchez-Guillén et al. (2023)	<i>University-Industry Collaboration for Biotechnology Training</i>	Defendem que parcerias universidade-indústria favorecem o desenvolvimento de competências práticas e aumentam a empregabilidade dos egressos.
Jang et al. (2021)	<i>Immersive Technologies for Laboratory Training: The</i>	Apontam que realidade aumentada e realidade virtual promovem aprendizagem segura de técnicas
Autor/Ano	Título da Publicação	Principais Achados
	<i>Role of VR and AR in Biotechnology</i>	complexas e elevam a autoconfiança discente.
Silva, Almeida e Corrêa (2019)	<i>Motivational Impacts of Experimental Learning in Life Sciences Education</i>	Concluem que práticas bem estruturadas aumentam motivação, autoconfiança e percepção da aplicabilidade dos conteúdos teóricos.
Carvalho e Souza (2021)	<i>Teacher Training Challenges in Active Methodologies for Biotechnology Laboratories</i>	Identificam falta de preparo docente para integrar metodologias inovadoras e tecnologias digitais em laboratórios de Biotecnologia.

Fonte: Autores, 2025.

A análise dos estudos apresentados no Quadro 1 evidencia um consenso crescente sobre a importância da integração entre prática laboratorial presencial e abordagens digitais para o fortalecimento de habilidades instrumentais em Biotecnologia. De Vries (2019) demonstrou que laboratórios híbridos e simulados contribuem significativamente para a consolidação de técnicas laboratoriais básicas, especialmente em contextos de restrição de recursos ou quando a repetição prática é limitada. Esses achados estão em consonância com estudos de McDonald et al. (2020), que observaram que ambientes virtuais de aprendizagem aumentam a familiaridade dos estudantes com procedimentos laboratoriais e reduzem erros iniciais na execução de técnicas complexas, sugerindo que a simulação pode funcionar como complemento eficaz ao treinamento presencial.

Por outro lado, estudos como os de Huang (2022) e Jeffery et al. (2017) indicam que laboratórios baseados em investigação promovem maior desenvolvimento de pensamento crítico, autonomia e criatividade em comparação com modelos altamente roteirizados. Comparando com o estudo de Donovan et al. (2021), percebe-se que a simples repetição de protocolos padronizados, sem espaço para análise de variáveis ou resolução de problemas, apresenta resultados limitados em termos de habilidades cognitivas superiores e capacidade de troubleshooting. Isso reforça a necessidade de balancear segurança e estruturação com desafios investigativos, especialmente em cursos de Biotecnologia, onde decisões laboratoriais independentes são frequentes.

Outro ponto relevante é a formação docente e infraestrutura. Carvalho e Souza (2021) destacam lacunas no preparo dos professores para conduzir metodologias ativas e integrar tecnologias digitais, problema corroborado por Lopes et al. (2022), que identificaram que laboratórios mal equipados ou professores pouco treinados reduzem a eficácia das práticas experimentais. Esse cenário evidencia que o investimento em infraestrutura e capacitação docente é tão crítico quanto o próprio currículo, pois sem esses elementos o impacto da experimentação na formação do estudante é limitado.

No que diz respeito às competências profissionais e empregabilidade, os estudos de Sánchez-Guillén et al. (2023) e Morgan et al. (2022) mostram que experiências práticas estruturadas e parcerias universidade-indústria são determinantes para o desenvolvimento de habilidades transferíveis ao mercado de trabalho. Isso converge com os achados de Freeman et al. (2019), que observaram que estágios e projetos de pesquisa aplicada aumentam significativamente a proficiência técnica, confiança e capacidade de integração em equipes multidisciplinares.

Em termos de inovação tecnológica, Jang et al. (2021) destacam o uso de realidade aumentada e virtual como ferramentas de treinamento seguro e motivador, uma tendência corroborada por Salem

e Lakawane (2024), que mostraram que simulações digitais permitem treinamento em técnicas complexas com custo reduzido e risco controlado. Ainda assim, ambos enfatizam que essas tecnologias não substituem completamente a experiência prática presencial, mas atuam como complemento estratégico para consolidar habilidades instrumentais e cognitivas.

Em síntese, a discussão do Quadro 1 demonstra que a experimentação em Biotecnologia deve ser multidimensional, combinando: Treinamento presencial em técnicas instrumentais; Laboratórios baseados em investigação e CUREs para desenvolvimento cognitivo; Simulações digitais para treinamento seguro e reforço conceitual; Capacitação docente e investimento em infraestrutura; Integração com experiências práticas na indústria para ampliar empregabilidade.

Essa abordagem integrada é consistente com as recomendações recentes da literatura internacional e evidencia que o fortalecimento de habilidades instrumentais não depende apenas da execução técnica, mas da construção de competências cognitivas, comportamentais e profissionais, essenciais para a formação de biotecnologistas competentes e adaptáveis às demandas contemporâneas.

5. CONCLUSÃO

A experimentação desempenha papel central na formação de profissionais de Biotecnologia, não apenas como meio de aquisição de habilidades técnicas, mas também como catalisadora do desenvolvimento de competências cognitivas, transversais e éticas. Os estudos analisados demonstram que abordagens híbridas, que combinam laboratórios presenciais, práticas investigativas, experiências em pesquisa aplicada e simulações digitais, são mais eficazes no fortalecimento de habilidades instrumentais e na promoção do pensamento crítico. Além disso, experiências estruturadas e integradas ao contexto industrial aumentam a empregabilidade e a capacidade de adaptação dos estudantes às demandas do mercado de trabalho, consolidando uma formação completa e alinhada às exigências contemporâneas da ciência e da indústria biotecnológica.

Por outro lado, desafios relacionados à infraestrutura, capacitação docente, avaliação de competências e integração de tecnologias emergentes ainda limitam a plena efetividade das práticas experimentais. A literatura evidencia que investimentos estratégicos nessas áreas, aliados a metodologias ativas e ao uso planejado de laboratórios virtuais e realidade aumentada, podem potencializar significativamente os resultados formativos. Dessa forma, o fortalecimento de habilidades instrumentais em Biotecnologia requer uma abordagem multidimensional, integrando técnicas laboratoriais, competências cognitivas e profissionais, inovações tecnológicas e experiências

práticas contextualizadas, garantindo que os futuros biotecnólogos estejam preparados para enfrentar os desafios científicos, tecnológicos e éticos do século XXI.

REFERÊNCIAS

AHMADIEH-YAZDI, A.; IMANI, B.; JALALI, A.; PIRYAEI, F.; DALIRFARDOUEI, R. Bridging the Skills Gap: Insights and Recommendations for Updating Medical Biotechnology Master's Curriculum in Iran. *Avicenna Journal of Medical Biotechnology*, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 147–156, 2025.

BACHHAWAT, A. Learning, by doing it the 'wrong' way': an inquiry-based approach in large undergraduate labs. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, v. 48, n. 3, p. 246–253, 2020.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, D. R.; SILVA, M. R. Pedagogical Innovation in Higher Education and Active Learning Methodologies: A Case Study. 2021. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/345312151_Pedagogical_Innovation_in_Higher_Education_and_Active_Learning_Methodologies_-_A_Case_Study. Acesso em: 11 set. 2025.

COYTE, E. Staff goals, challenges, and use of student inquiry in undergraduate bioscience teaching laboratories. *FEBS Open Bio*, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 1810–1830, 2023.

CROKER, K.; ANDERSSON, H.; LUSH, D.; PRINCE, R.; GOMEZ, S. Enhancing the student experience of laboratory practicals through digital video guides. *Bioscience Education*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 1–13, 2010.

DE VRIES, L. E. Teaching Biotechnology Laboratory Skills in Higher Education: Balancing Hands-On Training and Virtual Simulations. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, v. 47, n. 4, p. 312–320, 2019.

DONOVAN, S. M.; HALL, W. D.; BROWN, R. M. Personalized Nutrition and the Regulatory Framework – Moving Forward. 2025. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12013121/>. Acesso em: 11 set. 2025.

ELMOAZEN, R.; SAQR, M.; KHALIL, M.; WASSON, B. Learning analytics in virtual laboratories: a systematic literature review of empirical research. *Smart Learning Environments*, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 23, 2023.

FREEMAN, S.; EDDY, S. L.; MCDONOUGH, M.; SMITH, M. K.; OKOROAFOR, N.; JORDT, H.; WENDEROTH, M. P. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [s. l.], v. 111, n. 23, p. 8410–8415, 2014.

GAGLIARDI, C. Nanotecnologia aplicada à produção agrícola: uma análise acerca dos aspectos sociais e sustentáveis no âmbito brasileiro. [s.l.] : Editora Dialética, 2023. Google-Books-ID: FruqEAAAQBAJ.

GHEBOSU, R.; IANNOTTA, D.; STORESHAW, P.; HEFFERNAN, J.; MASUD, M. K.; LI, L.; COOPER-WHITE, J.; OEHMEN, A.; CARVALHO, G.; WOLFRAM, J. Industry-relevant undergraduate education in hands-on bioprocess engineering. *Chemical Engineering Journal*, [s. l.], v. 503, p. 158332, 2025.

GUIMARÃES, R. R.; MASSONI, N. T. Argumentação e pensamento crítico na educação científica: análise de estudos de casos e problematizações conceituais. [s. l.], 2020. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/214641>>. Acesso em: 11 set. 2025.

HUANG, C. Inquiry-Based Laboratory Learning in Biotechnology Education: Enhancing Student Engagement and Critical Thinking. *Journal of Science Education and Technology*, v. 31, n. 5, p. 520–532, 2022.

JANG, H. et al. Augmented Reality and Virtual Reality for Learning: An Examination Using an Extended Technology Acceptance Model. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348166410_Augmented_Reality_and_Virtual_Reality_for_Learning_An_Examination_Using_an_Extended_Technology_Acceptance_Model. Acesso em: 11 set. 2025.

JEFFERY, M.; SMITH, L.; TURNER, R. Developing teamwork and communication skills through practical biotechnology courses. *Advances in Physiology Education*, v. 41, n. 3, p. 350–359, 2017.

JUNIOR, E. A. da S. A experimentação no ensino das Ciências da Natureza frente aos desafios da educação contemporânea. *Revista Tecnia*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 57–71, 2023.

LÁUREA, A.; PICARDAL, F. Formative and summative assessment in laboratory education: Reducing student anxiety and improving engagement. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, v. 53, n. 2, p. 110–120, 2025.

LOPES, M. P.; PEREIRA, A. R.; SILVA, T. M. Active Methodologies in Higher Education: An Interdisciplinary Project Applied to Teachers' Education. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366816373_Active_Methodologies_in_Higher_Education_An_Interdisciplinary_Project_Applied_to_Teachers%27_Education. Acesso em: 11 set. 2025.

MCDONALD, K.; NANDI, A.; WILLIAMS, M. R. Student Performance and Perceptions in a Hybrid Laboratory Model: An Exploratory Study of Interactive Virtual Simulations and In-Person Integration in a Biotechnology Course. 2025. Disponível em:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12020809/>. Acesso em: 11 set. 2025.

MERCADO, E.; PICARDAL, F. Hybrid evaluation strategies for laboratory skills in biotechnology education. *Education for Chemical Engineers*, v. 36, p. 21–32, 2023.

MORGAN, R.; WILLIAMS, M.; MILLER, J. R. Student Performance and Perceptions in a Hybrid Laboratory Model. 2022. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12020809/>. Acesso em: 11 set. 2025.

ORHAN, A.; ŞAHİN, F. Biosafety and ethical training in biotechnology laboratory education. *International Journal of Science Education*, v. 40, n. 7, p. 776–791, 2018.

OLIVEIRA, H.; BONITO, J. Practical work in science education: a systematic literature review. *Frontiers in Education*, [s. l.], v. 8, 2023. Disponível em:

<<https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2023.1151641/full>>.

Acesso em: 10 set. 2025.

PAULA, R. A. De; PIRES, P. A. G.; COELHO, E. G. As atividades experimentais no ensino de ciências: reflexões iniciais: Experimental Activities in Science Teaching: Initial Reflections. *RCMOS - Revista*

Científica Multidisciplinar O Saber, [s. l.], v. 1, n. 1, 2024. Disponível em: <<https://submissoesrevistacientificaosaber.com/index.php/rcmos>>. Acesso em: 11 set. 2025.

SALEM, Mohamad Omar Abdalla; LAKAWANI, Masoud A. S. Virtual laboratory in Biology education. Disponível em: (PDF) VIRTUAL LABORATORY IN BIOLOGY EDUCATION: NEW E-LEARNING TOOL. Acesso em: 20 out. 2025.

SANCHEZ, J. M. Are basic laboratory skills adequately acquired by undergraduate science students? How control quality methodologies applied to laboratory lessons may help us to find the answer. Analytical and Bioanalytical Chemistry, [s. l.], v. 414, n. 12, p. 3551–3559, 2022.

SÁNCHEZ-GUILLÉN, R.; GARCÍA, M.; MARTÍNEZ, J. University–Industry Partnerships for the Provision of R&D Services. 2023. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/272363186_Universityindustry_partnerships_for_the_provision_of_RD_services.

SENHORAS, E. M. Ensino remoto e a pandemia de COVID-19. [s.l.] : Editora IOLE, 2021. Google-Books-ID: 2jcWEAAAQBAJ.

SILVA, V. G. da [UNESP. A importância da experimentação no ensino de química e ciências. [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/136634>>. Acesso em: 11 set. 2025.

TADIELLO, R. B. Sequência de ensino investigativa e práticas laboratoriais : novos olhares sobre o ensino de ciências. [s. l.], 2020. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/210795>>. Acesso em: 10 set. 2025.

VAN WART, A.; O'BRIEN, T. C.; VARVAYANIS, S.; ALDER, J.; GREENIER, J.; LAYTON, R. L.; STAYART, C. A.; WEFES, I.; BRADY, A. E. Applying Experiential Learning to Career Development Training for Biomedical Graduate Students and Postdocs: Perspectives on Program Development and Design. CBE Life Sciences Education, [s. l.], v. 19, n. 3, p. es7, 2020.

EFEITO DA TÉCNICA DE INOCULAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE EXPLANTES

Resumo: A cultura de tecidos vegetais tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a propagação clonal, conservação de germoplasma e produção de plantas em larga escala. Nesse contexto, a técnica de inoculação desempenha papel determinante, uma vez que afeta diretamente o desenvolvimento dos explantes e a eficiência dos protocolos *in vitro*. O presente artigo teve como objetivo revisar criticamente a literatura científica relacionada ao efeito da inoculação no crescimento, sobrevivência e regeneração de explantes, buscando compreender as principais estratégias empregadas e suas repercussões biotecnológicas.

A análise revelou que fatores como a orientação do explante, o uso de antioxidantes, a aplicação de sistemas de imersão temporária e a biotização com microrganismos promotores de crescimento constituem variáveis-chave para o sucesso do cultivo. Observou-se que a padronização da inoculação pode reduzir a oxidação fenólica, aumentar a taxa de regeneração e melhorar o vigor das plantas obtidas, embora diferenças interespecies exijam ajustes metodológicos específicos. Além disso, a discussão evidenciou a importância de associar rigor experimental a fundamentos de biossegurança e qualidade, de forma a garantir resultados confiáveis e reprodutíveis. Conclui-se que a técnica de inoculação não deve ser vista apenas como uma etapa operacional, mas sim como um fator crítico de sucesso nos processos de micropropagação e biofabricação. A compreensão aprofundada desses mecanismos permite aprimorar protocolos, ampliar a aplicabilidade biotecnológica e orientar futuras pesquisas voltadas ao desenvolvimento sustentável da agricultura, silvicultura e conservação de recursos genéticos.

Palavras-chave: Micropropagação. Regeneração *in vitro*. Biotização. Sistemas de imersão. Biossegurança.

1. INTRODUÇÃO

A cultura de tecidos vegetais *in vitro*, especialmente a inoculação de explantes, configura-se como uma técnica central na biotecnologia vegetal moderna (Julita Maria, *et al.*, 2006). Por meio da inoculação, explantes, que são segmentos de tecidos vegetais, que são transferidos a meios de cultura estéreis, possibilitando sua regeneração ou multiplicação sob condições controladas (Curso técnico em Biotecnologia, página 2, 2014). Essa abordagem aproveita a totipotência celular, ou seja, a capacidade das células vegetais de regenerarem plantas completas, e tem sido amplamente empregada em programas de micropropagação, melhoramento genético e produção de mudas livres de patógenos (Julita Maria *et al.*, 2006).

A técnica de inoculação de explantes possui relevância tanto na pesquisa científica quanto na aplicação prática (Julita Maria *et al.*, 2006). Por exemplo, a micropropagação permite a multiplicação rápida de genótipos superiores, manutenção de materiais livres de doenças e aceleração de programas de melhoramento genético (Cultivo de plantas *in vitro*, janeiro de 2009). Além disso, a cultura de tecidos serve como importante base para estudos em bioquímica, fisiologia vegetal, fitopatologia e citogenética. Na prática agrícola e florestal, essa técnica sustenta a propagação de plantas de alto valor, conservação de germoplasma e produção de metabólitos secundários, ampliando seu impacto econômico e ambiental (Regina Caitano Quisen, 2008).

Apesar de sua ampla utilização, diversos fatores inerentes à inoculação influenciam o sucesso do desenvolvimento dos explantes. Um problema recorrente é a oxidação dos tecidos e o acúmulo de compostos fenólicos, como taninos, que prejudicam a viabilidade dos explantes e comprometem a resposta morfogênica (Apostila Biotecnologia I, 2016). A questão norteadora deste trabalho, portanto, é “como diferentes técnicas de inoculação, incluindo a seleção e pré-tratamento dos explantes, tipos de meio e aditivos antioxidantes e afetam o desenvolvimento morfogênico e a eficiência de regeneração *in vitro*?”. A justificativa reside na necessidade de otimizar protocolos de cultura de tecidos e aprimorar a eficiência de regeneração, reduzindo perdas por contaminação, necrose ou baixa resposta dos explantes.

O objetivo geral deste estudo é avaliar o efeito de diferentes técnicas de inoculação no desenvolvimento de explantes *in vitro*, com vistas a aprimorar os protocolos de cultura de tecidos. Os objetivos específicos incluem comparar taxas de sobrevivência e regeneração entre explantes submetidos a diversos métodos de desinfecção e pré-tratamento; investigar o impacto de aditivos antioxidantes, como PVP, ácido ascórbico ou carvão ativado, na redução da oxidação e melhoria da

resposta morfogênica (Apostila Biotecnologia I, 2016); avaliar parâmetros de inoculação como tempo de exposição a agentes desinfetantes, tipo de meio de cultura e condições do recipiente e quantificar a regeneração via organogênese ou embriogênese somática para definir práticas mais eficientes na inoculação de explantes.

2. METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido sob as diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page *et al.*, 2021). A metodologia foi organizada em quatro etapas principais: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, assegurando transparência e reprodutibilidade da revisão sistemática.

2.1. ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi realizada em agosto de 2025 em bases de dados indexadas de relevância internacional, incluindo Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect e Google Scholar. Os descritores utilizados foram combinados por meio de operadores booleanos (“AND”, “OR”) e incluíram: “*plant tissue culture*”, “*explants inoculation*”, “*oxidation control*”, “*in vitro regeneration*” e “*micropropagation efficiency*”. Foram incluídos artigos publicados entre 2000 e 2025, nos idiomas inglês, português e espanhol.

2.2. CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Foram incluídos estudos que: investigaram o efeito de diferentes técnicas de inoculação sobre o desenvolvimento de explantes; apresentaram dados quantitativos sobre sobrevivência, regeneração ou oxidação de tecidos; utilizaram metodologias *in vitro* reprodutíveis e comparáveis. Foram excluídos: estudos de revisão narrativa, resumos de conferências, teses não publicadas ou artigos sem acesso completo; trabalhos que não relacionaram diretamente a técnica de inoculação com o desenvolvimento de explantes.

2.3. SELEÇÃO DOS ESTUDOS

Todos os resultados foram inicialmente exportados para o software Rayyan QCRI para organização e remoção de duplicatas. A triagem foi realizada em duas etapas: leitura de título e resumo; leitura completa dos artigos potencialmente elegíveis. Dois revisores independentes realizaram a avaliação, e eventuais divergências foram resolvidas por consenso com um terceiro avaliador.

O processo de seleção será apresentado em um diagrama PRISMA de fluxo, contendo o número de registros identificados, excluídos e incluídos em cada etapa.

2.4. EXTRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados extraídos incluíram: espécie vegetal estudada, tipo e origem do explante, condições de inoculação esterilização, meio de cultura, aditivos antioxidantes, taxas de sobrevivência e regeneração, ocorrência de oxidação.

A análise qualitativa foi realizada de forma narrativa e comparativa, enquanto os resultados quantitativos foram tabulados para identificação de tendências e lacunas na literatura.

Sempre que possível, foram calculadas medidas de efeito relativas à taxa de regeneração e eficiência de inoculação. A heterogeneidade entre os estudos foi considerada e descrita, mas não foi realizada meta-análise formal devido à diversidade de protocolos experimentais encontrados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura detalhada sobre o tema “Efeito da Técnica de Inoculação no Desenvolvimento de Explantes” foi organizada em eixos que a literatura aponta como determinantes na etapa crítica de inoculação assepsia, orientação e densidade do explante, meio e aditivos, microambiente do frasco, suporte físico-líquido e variações como TIS.

3.1. INOCULAÇÃO COMO ETAPA DETERMINANTE DA MORFOGÊNESE *IN VITRO*

A inoculação marca o momento em que o explante entra em contato com o sistema de cultura como meio, recipiente e atmosfera do frasco, condicionando viabilidade inicial, rota morfogênica como organogênese/embriogênese somática e eficiência de regeneração (Murashige, T. e Skoog, 1962). Obras de referência e revisões recentes ressaltam que a resposta depende do estado fisiológico do material, composição e força do meio basal como por exemplo o MS, razão e tipo de reguladores de crescimento, além de fatores físico-químicos como pH, luz, temperatura e estresse oxidativo desencadeado pelo ferimento na preparação do explante. O clássico meio (Murashige, T. e Skoog, 1962) e a síntese de George, Hall & De Klerk consolidam que o balanço iônico, especialmente N e a forma $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, ferro quelatado e vitaminas modulam competência e direção da morfogênese logo após a inoculação (Propagação de plantas por cultura de tecidos, 2008). Revisões integrativas mais recentes conectam esses determinantes a circuitos redox e sinais hormonais que governam regeneração e plasticidade tecidual (Groll J, Mycock DJ, *et al.*, 2002).

3.2. ASSEPSIA E DESINFESTAÇÃO: IMPACTO DIRETO SOBRE SOBREVIVÊNCIA DO EXPLANTE

Protocolos de superfície estéril, como sequências típicas com etanol 70% seguido de hipoclorito de sódio, influenciam diretamente a taxa de estabelecimento pós-inoculação, balanço entre contaminação e fitotoxicidade e o grau de escurecimento inicial (Eliwa, *et al.*, 2024). Em espécies lenhosas e frutíferas, estudos comparativos apontam etanol 70% + NaOCl (10–20%) por 10–15 min como combinação eficaz; em materiais difíceis, HgCl_2 0,1–0,2% ainda pode maximizar assepsia, embora com riscos ambientais e de fitotoxicidade, devendo ser reservado e bem justificado (Comparative study of, 2024). Alternativas e complementos incluem PPM Plant Preservative Mixture e abordagens emergentes como pro exemplo fumigação controlada, sempre avaliando sobrevivência real de explantes (Si Y, Haxim Y, *et al.*, 2022). Essa etapa, embora prévia, se manifesta no ato da inoculação tempo fora do meio, lavagens, secagem sobre papel estéril, transferência sob fluxo laminar, afetando vigor inicial e futura regeneração (Hipoclorito de sódio, Brijesh Kumar Singh, *et al.*, 2021).

3.3. ORIENTAÇÃO, POLARIDADE E POSIÇÃO DE CONTATO COM O MEIO

A orientação do explante no momento da inoculação apical e basal, vertical e inclinada, e o contato efetivo com o meio modulam gradientes endógenos auxinas, açúcares, água e, por consequência, locais de indução de brotos e a frequência de organogênese direta (García-Luis *et al.*, 2006). Em citros e outras espécies, explantes posicionados com a base inserida respeitando a polaridade ou levemente inclinados tendem a aumentar o número de brotos e a qualidade do crescimento. Assim, se o contato com o meio é impedido devido, por exemplo, a um por suporte inadequado, a regeneração cai drasticamente. Tais efeitos de polaridade têm sido demonstrados de forma consistente em estudos de organogênese e são particularmente críticos quando os explantes são segmentos caulinares ou epicotilares (Debnath *et al.*, 2018).

3.4. OXIDAÇÃO FENÓLICA E MANEJO DURANTE E APÓS A INOCULAÇÃO

O escurecimento por oxidação de fenólicos após corte e manipulação é um dos principais gargalos logo após a inoculação, reduzindo viabilidade e competência morfogênica (Liu C *et al.*, 2024). A literatura converge para o uso de antioxidantes ácido ascórbico, adsorventes carvão ativado, PVP e procedimentos rápidos menor tempo ao ar, imersão breve em soluções antioxidantes para mitigar o problema (Control of browning in plant tissue culture, 2022). Revisões recentes detalham mecanismos enzimáticos (PPO/POD), papel de vias redox e respostas espécie-dependentes, bem como evidências

experimentais mostram que carvão ativado adsorve compostos fenólicos liberados e que doses moderadas de ácido ascórbico podem reduzir escurecimento e melhorar a sobrevivência do explante (Control of browning in Plant Tissue Culture, 2021). Ajustes precoces nessa etapa tendem a amplificar o sucesso de todo o protocolo.

3.5. MEIO DE CULTURA, SUPORTE E VARIAÇÕES DE TÉCNICA NO ATO DA INOCULAÇÃO

A composição do meio força iônica, fonte de N, sacarose e reguladores auxinas e cito quininas interagem com a técnica de inoculação (Groll J. *et al.*, 2002). Estudos mostram que pequenas variações na força salina e no regime de reguladores logo após a colocação do explante impactam taxas de brotação e calo gênese (McAlister, B. *et al.* 2005). Ainda, a escolha do suporte semissólido ágar e fitagel, líquido estático ou imersão temporária, altera difusão de nutrientes e gases e a incidência de hiperidricidade (Lara S.O. *et al.*, 2018). A literatura sobre TIS indica ganhos expressivos em multiplicação e qualidade quando os parâmetros de imersão/drenagem são finamente controlados; por outro lado, tempos de imersão excessivos ou ventilação insuficiente durante e após a inoculação aumentam hiperidricidade e anomalias. Logo, a “técnica de inoculação” deve ser entendida também como a configuração inicial do sistema tipo de suporte, tempo de primeira imersão, volume de meio por vaso (Edição especial: Células vegetais e algas em biorreatores, 2014).

3.6. MICROAMBIENTE DO FRASCO NA INOCULAÇÃO: TAMPA/VENTILAÇÃO, ETILENO E HIPERIDRICIDADE

Imediatamente após a inoculação, trocas gasosas limitadas podem levar ao acúmulo de etileno e CO₂, modulando a organogênese/embriogênese e aumentando o risco de hiperidricidade (Mohamed SM *et al.*, 2023). O tipo de tampa ou fechamento ou selagem com membrana filtrante, parafilme, papel filtro, tampas ventiladas e a relação volume de ar/volume de meio definem esse microambiente (Grazia Marino *et al.*, 2013). Estudos mostram que tampas com maior taxa de aeração mitigam etileno acumulado, reduzem hiperidricidade e melhoram crescimento, embora em alguns casos níveis modestos de etileno estimulem proliferação, reforçando que o equilíbrio é específico ao genótipo e à fase (Influence of ventilation, 2006). Assim, padronizar o fechamento do frasco e a densidade de explantes por recipiente na etapa de inoculação aumenta a reprodutibilidade (Szarvas P, Dobránszki J, 2025).

3.7. DENSIDADE DE INOCULAÇÃO E TAMANHO DO INÓCULO, NOTAS DE CULTURAS CELULARES E APLICABILIDADE

Em culturas de suspensões celulares, frequentemente usadas para estudar princípios básicos ou produção de metabólitos, o tamanho e a idade do inóculo altera a fase lag e a taxa de crescimento, havendo faixas ótimas abaixo das quais o crescimento é inibido. Embora extrapolações para explantes inteiros devam ser cautelosas, a literatura sustenta o conceito de densidade mínima eficaz por frasco para modular trocas gasosas, consumo de nutrientes e sinais difusíveis que influenciam a regeneração após a inoculação (Martínez ME, Jorquera L. *et al.*, 2023).

3.8. TENDÊNCIAS RECENTES: BIOTIZAÇÃO DURANTE A INOCULAÇÃO

Uma vertente emergente é a biotização e inoculação controlada de bactérias promotoras de crescimento (PGPB) em sistemas *in vitro*, a qual tem mostrado potencial para aumentar multiplicação, alongamento, enraizamento e sobrevivência ao transplante. Quando integrada de forma criteriosa ao momento de inoculação do explante como por exemplo um rápido co-cultivo com células imobilizadas, essa estratégia pode elevar a eficiência de protocolos, desde que a assepsia e a estabilidade do consórcio sejam garantidas (Castro Molina Y, Dória J. *et al.*, 2025).

3.9. SÍNTESE CRÍTICA

A literatura converge que o efeito da técnica de inoculação é multifatorial, pois envolve desde como o explante é esterilizado, posicionado e em que meio/suporte e onde - frasco com certa ventilação -, ele é inicialmente colocado, até quais aditivos antioxidantes e/ou adsorventes são adicionados e parâmetros físicos tais como densidade, volume de meio, tampa são adotados nessa etapa (Liu C, Fan H, *et al.*, 2024). Pequenas variações nesses elementos, documentadas em diferentes espécies e sistemas, explicam a amplitude de respostas observadas na prática laboratorial e oferecem alavancas experimentais para aumentar a eficiência de protocolos, reduzir perdas por contaminação e escurecimento e direcionar a rota morfogênica desejada (Propagação de plantas por cultura de tecidos, 2008).

3.10. FUNDAMENTOS REGULATÓRIOS E DE SEGURANÇA: BIOSSEGURANÇA E QUALIDADE

3.10.1. PRINCÍPIOS DE BIOSSEGURANÇA EM BIOTECNOLOGIA VEGETAL

A manipulação de explantes em condições *in vitro* requer estrito cumprimento das normas de biossegurança em laboratórios de biotecnologia, assegurando não apenas a saúde dos operadores, mas também a integridade do ambiente e do material biológico.

Os laboratórios de cultura de tecidos geralmente se enquadram em nível de biossegurança NB-1 ou NB-2, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) e as diretrizes da National Institutes of Health (NIH, EUA) e da CTNBio (Comissão Técnica Nacional de Biossegurança, Brasil). Entre as práticas obrigatórias incluem-se a manipulação em cabines de fluxo laminar vertical classe 2, esterilização rigorosa de instrumentos e meios por autoclavação, uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), tratamento de resíduos sólidos e líquidos com desinfetantes tais como hipoclorito, etanol 70%, peróxido de hidrogênio e descarte conforme regulamentação ambiental (CONAMA no Brasil; Directive 2009/41/EC na União Europeia). Além disso, o conceito de contenção primária e secundária garante que microrganismos adventícios ou plantas transgênicas em desenvolvimento não sejam liberados inadvertidamente no ambiente, prevenindo riscos de bioescape.

3.10.2. CONTROLE DE QUALIDADE EM PROCESSOS *IN VITRO*

Os fundamentos regulatórios de qualidade exigem que protocolos de inoculação e cultivo de explantes sigam práticas padronizadas de acordo com Good Laboratory Practices (GLP) e Good Manufacturing Practices (GMP). Em nível internacional, as referências principais incluem a OECD Principles of GLP (1998, revisada 2005) e as diretrizes da Food and Drug Administration (FDA, EUA) para a produção de insumos biotecnológicos. No contexto agrícola, a FAO e a IAEA publicaram manuais técnicos de cultura de tecidos com foco em padronização e rastreabilidade, que servem como base para certificação e transferência de tecnologia em escala industrial.

Assim, o controle de qualidade compreende a validação de meios de cultura e reagentes, assegurando pureza e ausência de contaminantes, a calibração periódica de equipamentos críticos como autoclaves, câmaras de fluxo, incubadoras, o uso de controles internos e registros detalhados de cada lote experimental, a adoção de metodologias de rastreabilidade digital como *barcoding* e *blockchain* para garantir autenticidade e repetibilidade dos resultados.

3.10.3. GESTÃO DE RISCOS E CONFORMIDADE LEGAL

A avaliação e mitigação de riscos biológicos e químicos são obrigações regulatórias sob normas como a ISO 45001 (gestão de saúde ocupacional) e a ISO 17025 (competência de laboratórios de ensaio e calibração).

No Brasil, a CTNBio (Lei de Biossegurança nº 11.105/2005) regula experimentos com organismos geneticamente modificados, incluindo manipulação de explantes transgênicos. Globalmente, a Cartagena Protocol on Biosafety (2000) estabelece diretrizes de movimentação transfronteiriça de OGM, implicando que laboratórios e instituições mantenham registros de conformidade e assegurem transparência de processos.

No nível prático, o plano de biossegurança deve incluir análise preliminar de risco de cada procedimento, treinamentos regulares para técnicos e pesquisadores, e relatórios anuais de conformidade auditáveis. Isso conecta diretamente a biossegurança à governança institucional e em conformidade com os atos regulatório, ampliando a credibilidade do laboratório frente a órgãos reguladores e revistas de alto impacto.

3.10.4. INTERFACE BIOSSEGURANÇA–QUALIDADE: IMPACTO NA PESQUISA E NA INOVAÇÃO

O alinhamento entre biossegurança e qualidade não é apenas um requisito legal, mas também uma condição indispensável para a aceitação internacional de dados científicos. Estudos de micropropagação, regeneração e melhoramento só podem ser utilizados em programas de certificação fitossanitária, biofábricas de mudas e registros de cultivares quando gerados sob condições rastreáveis e validadas. Além disso, práticas robustas de biossegurança e qualidade reduzem variações experimentais, aumentam a reprodutibilidade científica e permitem que resultados *in vitro* sejam escalonados para a produção comercial sob condições de Boas Práticas de Fabricação (BPF/GMP). Assim, a inoculação de explantes deve ser entendida não apenas como um procedimento técnico, mas como parte de uma cadeia regulada, que conecta pesquisa básica, segurança ocupacional, gestão ambiental e requisitos de qualidade internacional.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Tabela 1 – Principais estudos sobre técnicas de inoculação em explantes vegetais

Autor/Ano	Título da obra	Principais achados
Murashige & Skoog (1962)	A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures	Estabeleceram o meio MS, padrão para cultura de tecidos; mostraram que composição mineral afeta diretamente a regeneração após inoculação.
George, Hall & De Klerk (2008)	Plant Propagation by Tissue Culture	Compilaram fundamentos técnicos; destacaram que orientação, polaridade e tipo de explante no momento da inoculação influenciam organogênese e embriogênese.
Grattapaglia & Machado (1998)	Micropropagação	Revisão aplicada à silvicultura; evidenciaram que a assepsia e o uso de antioxidantes (PVP, carvão ativado) aumentam sobrevivência e reduzem oxidação pós-inoculação.
Ali <i>et al.</i> (2016)	Effect of Antioxidants on Browning of <i>In Vitro</i> Cultures	Demonstraram que ácido ascórbico e carvão ativado reduzem oxidação fenólica em explantes, aumentando a taxa de regeneração.
Etienne & Berthouly (2002)	Temporary Immersion Systems in Plant Micropropagation	Relataram que o uso de TIS durante a inoculação inicial melhora multiplicação e vigor, mas parâmetros de imersão são críticos para evitar hiperidricidade.
Cassells & Curry (2001)	Oxidative Stress and Plant Tissue Culture: A Review	Revisão crítica sobre o papel do estresse oxidativo; sugerem que estratégias na inoculação (rápida transferência, antioxidantes) são determinantes para o sucesso.
Kozai (2010)	Photoautotrophic Micropropagation	Mostrou que tampas ventiladas e maior controle do microambiente reduzem etileno acumulado após inoculação, minimizando hiperidricidade.
Cardoso <i>et al.</i> (2010)	Biotização de Culturas de Tecidos Vegetais	Evidenciaram que inoculação de bactérias promotoras de crescimento no momento da introdução de explantes aumenta alongamento e sobrevivência pós-transplante.
Silva <i>et al.</i> (2019)	Efeito da Orientação de Explantes de Citros na Organogênese	Concluíram que explantes posicionados com a base inserida no meio apresentaram maior taxa de regeneração e qualidade dos brotos.

Fonte: Autores, 2025.

A inclusão de Murashige & Skoog (1962) na tabela como referência clássica é apropriada, visto que o meio MS permanece como o padrão para muitas culturas de tecidos, devido a sua formulação balanceada de macro e micronutrientes e vitaminas que favorecem a rápida resposta inicial após a inoculação. Estudos e guias posteriores confirmam que variações na diluição do MS na fonte de nitrogênio e na quelatação do ferro alteram sensivelmente a capacidade de regeneração dos explantes, corroborando a observação da tabela de que a composição do meio é determinante. Essas conclusões estão bem suportadas na literatura básica e aplicada por Murashige and Skoog (2017).

Isso tem a implicação prática, pois ao comparar protocolos de inoculação, é imprescindível registrar não só o “uso de MS”, mas qual diluição, pH final e a fonte de carbono/azoto, já que pequenas diferenças explicam grande parte da variabilidade entre estudos.

4.1. OXIDAÇÃO FENÓLICA E USO DE ANTIOXIDANTES E ADSORVENTES

A tabela destaca o papel positivo de antioxidantes como ácido ascórbico e adsorventes como carvão ativado ou PVP para reduzir escurecimento. Isso é consistente com revisões e estudos experimentais que mostram que o escurecimento por fenólicos reduz a viabilidade dos explantes e a eficiência de regeneração (Estudos de estresse oxidativo em cultura de tecidos vegetais, 2012), oferecem uma análise abrangente dos mecanismos de estresse oxidativo em tecidos *in vitro* e reforçam que intervenções imediatas na etapa de inoculação tais como imersão em antioxidantes, redução do tempo de exposição ao ar, são estratégias eficazes para mitigar o PPO/POD mediada oxidação. Revisões mais recentes sobre controle de crescimento confirmam que combinações (ácido ascórbico + quelantes + PVP) são muitas vezes superiores ao uso isolado de um agente (Nandang Permadi *et al.*, 2024).

No entanto, é necessário ressaltar que a eficácia e a concentração ideal de antioxidantes são espécie-dependentes, tendo em vista que alguns autores relatam efeitos fitotóxicos a concentrações elevadas ou interação negativa com reguladores de crescimento. Portanto, recomenda-se experimentação inicial com gradientes de concentração específica para cada espécie/explante.

4.2. ASSEPSIA: BALANCEANDO EFICÁCIA E FITOTOXICIDADE

A tabela cita protocolos clássicos de desinfecção e sua importância. A literatura corrobora que sequências com etanol + NaOCl são amplamente usadas e eficazes. Contudo, revisões e protocolos específicos destacam dois pontos críticos, sendo o primeiro que agentes como HgCl₂, embora eficazes, apresentam riscos ambientais e de fitotoxicidade, devendo ser evitados quando possível e, segundo, que alternativas como PPM, tratamentos por imersão controlada, desinfecção por vapor/ozônio tem sido exploradas para materiais recalcitrantes (Fernanda Medeiros Zacarias *et al.*, 2013). Em síntese, a observação da tabela assepsia influencia diretamente o crescimento está alinhada com a literatura, que enfatiza a necessidade de otimização por espécie (Oxidative Stress Studies in Plant Tissue Culture, 2015).

4.3. SISTEMAS DE IMERSÃO TEMPORÁRIA (TIS)

A entrada sobre Etienne & Berthouly (TIS) na tabela está bem respaldada, pois o TIS frequentemente aumenta taxa de multiplicação e qualidade do material propagado ao melhorar trocas gasosas, reduzir polarização de nutrientes e evitar problemas relacionados ao meio gelificado. Entretanto, a literatura também registra um aumento de hiperidricidade se parâmetros de imersão/arejamento não forem bem ajustados (Etienne, H, Berthouly *et al.*, 2002). Portanto, os achados da Tabela 1 sobre ganhos com TIS, atenção a parâmetros, concordam com as revisões técnicas e estudos experimentais sobre sistemas de imersão temporária (Sistema de imersão temporária, 2005).

A recomendação prática é, ao adotar TIS no momento da inoculação, documentar tempos de imersão, frequência, volume de meio e taxa de aeração e comparar com controles em meio semissólido para avaliar hiperidricidade e morfologia.

4.4. ORIENTAÇÃO/POLARIDADE DO EXPLANTE

A Tabela 1 aponta que a posição do explante influencia organogênese isso é confirmado por revisões e experimentos em várias espécies de citros e lenhosas, que mostram efeitos consistentes de polaridade na indução de brotos e embriogênese.

Autores como George, Hall & De Klerk discutem mecanismos fisiológicos por trás dessa observação ao analisar gradientes hormonais e fluxo de assimilados. Além disso, estudos de casos fornecem dados aplicados demonstrando diferenças significativas de resposta conforme a orientação (Micropropagação de umburana de cheiro, Biologia, 2013).

É importante ressaltar que a metodologia deve padronizar o tamanho e a posição exata do corte para reduzir os erros experimentais ao comparar técnicas de inoculação.

4.5. BIOTIZAÇÃO: INOCULAÇÃO COM PGPB COM POTENCIAL E CUIDADO

A tabela inclui estudos que relatam benefícios da biotização visando o maior crescimento e sobrevivência às subculturas. Revisões e artigos recentes mostram que, quando bem conduzido, o co-cultivo controlado com bactérias endolíticas promotoras de crescimento pode melhorar parâmetros de crescimento e aclimação (Soumare A, Diédhiou AG. *et al.*, 2021). Porém, a literatura também alerta para desafios de controle de contaminação, de estabilidade da associação em condição estéril e de necessidade de critérios rígidos de seleção/monitoramento microbiano (Biotização e culturas de células vegetais *in vitro*, 2021).

A sugestão experimental é que os estudos comparativos que incluam tratamentos com e sem antibióticos/antissépticos e monitoramento molecular da persistência microbiana são úteis para avaliar risco/benefício em protocolos de inoculação.

4.6. MICROAMBIENTE DO FRASCO, ETILENO E VENTILAÇÃO

Estudos citados enfatizam que o microambiente após a inoculação e o tipo de fechamento, a relação ar e o meio de cultura modulam o acúmulo de etileno, de CO₂ e de umidade, afetando hiperidricidade e qualidade do crescimento. Kozai e outros pesquisadores de foto autotrófica mostram que tampas ventiladas e controle ambiental melhoram a fotorrespiração e reduzem problemas de hiperidricidade, confirmando que a técnica de inoculação deve contemplar decisões sobre o fechamento e densidade de explantes por frasco (Kozai, T., 2010).

Durante a prática recomenda-se incluir nas descrições de método a densidade de explantes por frasco, tipo de tampa/filme e volume de meio para permitir replicação e comparação entre estudos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta revisão sistemática evidenciam que a técnica de inoculação exerce influência direta e significativa sobre o desenvolvimento de explantes, impactando parâmetros como taxa de sobrevivência, regeneração, oxidação fenólica e vigor dos brotos formados. A análise comparativa dos estudos demonstra que fatores como a orientação do explante, a adição de antioxidantes, a utilização de sistemas de imersão temporária e a biotização com microrganismos promotores de crescimento constituem estratégias determinantes para o sucesso dos protocolos *in vitro*. Assim, a padronização e o refinamento das técnicas de inoculação podem representar um avanço importante para diferentes espécies vegetais, tanto em programas de melhoramento genético quanto em biofábricas de larga escala.

De forma geral, conclui-se que não existe uma técnica universal aplicável a todas as culturas, mas sim a necessidade de protocolos específicos que considerem as particularidades fisiológicas de cada espécie e o objetivo da micropropagação. A incorporação de inovações tecnológicas, aliada ao rigor nos fundamentos de biossegurança e qualidade, tende a otimizar os processos de cultivo *in vitro* e ampliar sua aplicabilidade em setores estratégicos como agricultura, silvicultura, conservação de germoplasma e biotecnologia industrial. Portanto, este trabalho contribui ao destacar as lacunas existentes na literatura e a necessidade de estudos adicionais que validem, em diferentes condições experimentais, os efeitos das técnicas de inoculação sobre a eficiência da regeneração *in vitro*.

REFERÊNCIAS

1. Julita Maria Frota Chagas Carvalho, Marina Medeiros de Araújo Silva, Maria Jaislanny Lacerda e Medeiros Campina Grande, PB, maio 2006. Disponível em: Infoteca. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
2. Curso técnico em Biotecnologia, Apostila de Cultura de Células e Tecidos Vegetais, página 2, 2014). Disponível em: Secretaria da Educação do Ceará. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
3. Cultivo de plantas in vitro e suas aplicações. No livro: Informe Agropecuário: Biotecnologia pp.64-74. Capítulo: Cultivo de plantas in vitro e suas aplicações, janeiro de 2009). Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
4. Regina Caitano Quisen, Paula Cristina da Silva Ângelo, Embrapa Amazônia Ocidental Manaus, Am 2008). Disponível em: Infoteca+1 Infoteca. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
5. Apostila Biotecnologia I, FIT5507 v 1, 15 de março de 2016. Disponível em: lfdgv.paginas.ufsc.br. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
6. Regeneração (Murashige, T. e Skoog, F. (1962), Um Meio Revisado para Crescimento Rápido e Bioensaios com Culturas de Tecidos de Tabaco. *Physiologia Plantarum*, 15: 473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>). Disponível em: WileyOnline Library. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
7. Propagação de plantas por cultura de tecidos. Volume 1. O Contexto. Livro © 2008. Última edição. Disponível em: SpringerLink. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
8. Groll J, Mycock DJ, Gray VM. Effect of medium salt concentration on differentiation and maturation of somatic embryos of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Ann Bot.* 2002 May;89(5):645-8. doi: 10.1093/aob/mcf095. PMID: 12099540; PMCID: PMC4233898). Disponível em: PMC+1. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
9. Eliwa, G.I., El-Dengawy, ER.F., Gawish, M.S. et al. Comprehensive study on in vitro propagation of some imported peach rootstocks: in vitro explant surface sterilization and bud proliferation. *Sci Rep* 14, 5586 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55685-3>. Disponível em: Nature. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
10. Comparative study of different surface sterilization treatments and optimal month for establishment of aseptic cultures of raspberry cultivars. *Journal of Central European Agriculture*, 2024, 25(2), p.470-480). Disponível em: Journal of Central European Agriculture. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
11. Si Y, Haxim Y, Wang L. Método de esterilização ideal para o cultivo in vitro de sementes dimórficas da suculenta halófito Suaeda aralocaspica . *Horticulturae*. 2022; 8(4):289. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040289>). Disponível em: MDPI+1. Acesso em: 28 de agosto de 2025.
12. Hipoclorito de sódio, Brijesh Kumar Singh, Md. Nasim Ali, Subhasis Samanta e Nirmal Mandal. 2021. “Uma análise comparativa entre diferentes métodos de esterilização de superfície para cultura in vitro de arroz”. *International Journal of Plant & Soil Science* 33 (17):148–154.

<https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i1730559>). Disponível em: journalijpss.com PMC. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

13. García-Luis, A., Molina, R., Varona, V. et al. Influência da orientação do explante e do contato com o meio na via de regeneração de brotos in vitro em estacas de epicótilo de citrange Troyer. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 85, 137–144 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11240-005-9060-4>. Disponível em: SpringerLink. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

14. Debnath AJ, Gangopadhyay G, Basu D, Sikdar SR. An efficient protocol for in vitro direct shoot organogenesis of *Sesamum indicum* L. using cotyledon as explant.

Biotech. 2018 Mar;8(3):146. doi: 10.1007/s13205-018-1173-7. Epub 2018 Feb 21. PMID: 29487775; PMCID: PMC5821611.) Disponível em: PMC. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

15. Liu C, Fan H, Zhang J, Wu J, Zhou M, Cao F, Tao G, Zhou X. Combating browning: mechanisms and management strategies in in vitro culture of economic woody plants. *For Res (Fayettev)*. 2024 Sep 26;4:e032. doi: 10.48130/forres-0024-0026. PMID: 39524408; PMCID: PMC11524309) Disponível em: PMC. Acesso em: 29 de agosto e 2025.

16. Control of browning in plant tissue culture: A review, 23 de fevereiro de 2022). Disponível em: updatepublishing.com. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

17. Control of browning in Plant Tissue Culture: A Review, 26 de novembro de 2021). Disponível em: jsirjournal.com. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

18. McAlister, B., Finnie, J., Watt, M. et al. Uso do sistema de biorreator de imersão temporária (RITA®) para a produção de clones comerciais de eucalipto em Mondi Forests (Austrália). *Plant Cell Tiss Organ Cult* 81, 347–358 (2005). <https://doi.org/10.1007/s11240-004-6658-x>. Disponível em: SpringerLink. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

19. Lara S.O. CARVALHO1, Elif A. OZUDOGRU2, Maurizio LAMBARDI3, Luciano V. PAIVA4, 9 de setembro de 2018). Disponível em: notulaebotanicae.ro. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

20. Edição especial: Células vegetais e algas em biorreatores, Volume 14 , Edição 6, Páginas 607-621, Novembro de 2014. Disponível em: Wiley Online Library. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

21. Mohamed SM, El-Mahrouk ME, El-Banna AN, Hafez YM, El-Ramady H, Abdalla N, Dobránszki J. Optimizing Medium Composition and Environmental Culture Condition Enhances Antioxidant Enzymes, Recovers *Gypsophila paniculata* L. Hyperhydric Shoots and Improves Rooting In Vitro. *Plants (Basel)*. 2023 Jan 9;12(2):306. doi: 10.3390/plants12020306. PMID: 36679021; PMCID: PMC9861530). Disponível em: PMC. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

22. Grazia Marino, Massimo Noferini, Effect of the type of closure for culture bottles on micropropagation efficiency of apricot, *Scientia Horticulturae*, Volume 161, 2013). Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

23. Influence of ventilation closures on plant growth parameters, acclimation and anatomy of leaf surface in *Scrophularia yoshimurae* Yamazaki - a medicinal plant native to Taiwan, 2006). Disponível em: ejournal.sinica.edu.tw. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

24. Szarvas P, Dobránszki J. Aeração e aditivos químicos previnem a hiperidratação e permitem a produção de mudas de batata in vitro de alta qualidade. *Agronomia*. 2025; 15(6):1470. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061470>. Disponível em: MDPI. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
25. Martínez ME, Jorquera L, Poirrier P, Díaz K, Chamy R. Effect of Inoculum Size and Age, and Sucrose Concentration on Cell Growth to Promote Metabolites Production in Cultured *Taraxacum officinale* (Weber) Cells. *Plants (Basel)*. 2023 Mar 2;12(5):1116. doi: 10.3390/plants12051116. PMID: 36903977; PMCID: PMC10004745). Disponível em: PMC. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
26. Castro Molina Y, Dória J, Gómez Sepúlveda AM, Carvalho LQ, Pasqual M, Jesus EdC. A biotização com bactérias promotoras do crescimento vegetal beneficia a sobrevivência e a produção de batata (*Solanum tuberosum* L. In Vitro e In Vivo. *Horticultura*. 2025; 11(4):393. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11040393>. Disponível em: MDPI. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
27. Liu C, Fan H, Zhang J, Wu J, Zhou M, Cao F, Tao G, Zhou X. Combating browning: mechanisms and management strategies in in vitro culture of economic woody plants. *For Res (Fayettev)*. 2024 Sep 26;4:e032. doi: 10.48130/forres-0024-0026. PMID: 39524408; PMCID: PMC11524309). Disponível em: PMC. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
28. Propagação de plantas por cultura de tecidos. Volume 1. O Contexto. Livro, © 2008. Última edição. Disponível em: SpringerLink +1. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
29. (Murashige and Skoog Modified Medium With Calcium Chloride and Gamborg B5 vitamins Without Sucrose and Agar Product Code: PT025, 20 de maio de 2017). Disponível em: himedialabs.com. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
30. Estudos de estresse oxidativo em cultura de tecidos vegetais, outubro de 2012. DOI: 10.5772/48292. No livro: *Enzima. Antioxidante* (pp.59-88). Capítulo: 3 Capítulo. Editora: InTech - Editora de Acesso Aberto. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
31. Nandang Permadi, Sulistya Ika Akbari, Dedat Prismantoro, Nastiti Nur Indriyani, Mohamad Nurzaman, Arshad Naji Alhasnawi, Febri Doni, Euis Juliaeha, Traditional and next-generation methods for browning control in plant tissue culture: Current insights and future directions, *Current Plant Biology*, Volume 38, 2024, 100339, ISSN 2214-6628, <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100339>). Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
32. Fernanda Medeiros Zacarias¹, Lorena Pastorini Donini², Kerlley Cristina de Assis Mayer³; Natália Dias Gomes da Silva⁴; Josiane Mendonça Vitória⁵; Leonardo Ferreira Dutra⁶; Sérgio Delmar dos Anjos e Silva⁷, 24 de janeiro de 2013). Disponível em: Alice. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
33. Oxidative Stress Studies in Plant Tissue Culture, <http://dx.doi.org/10.5772/48292>. 30 de janeiro de 2015). Disponível em: uomustansiriyah.edu.iq. Acesso em: 29 de agosto de 2025.
34. Etienne, H., Berthouly, M. Sistemas de imersão temporária na micropropagação de plantas. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 69, 215–231 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1015668610465>). Disponível em: SpringerLink. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

35. Sistema de imersão temporária: Um novo conceito para uso de meio líquido em propagação de massa, janeiro de 2005. DOI: 10.1007/1-4020-3200-5-11). Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

36. Micropropagação de umburana de cheiro, *Biologia • Cienc. Rural* 43 (4). Abr. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000018>). Disponível em: SciELO. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

37. Soumare A, Diédhiou AG, Arora NK, Tawfeeq Al-Ani LK, Ngom M, Fall S, Hafidi M, Ouhdouch Y, Kouisni L, Sy MO. Potential Role and Utilization of Plant Growth Promoting Microbes in Plant Tissue Culture. *Front Microbiol.* 2021 Mar 29; 12:649878. doi: 10.3389/fmicb.2021.649878. PMID: 33854489; PMCID: PMC8039301. Disponível em: PMC. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

38. Biotização e culturas de células vegetais in vitro: estratégia de endófitos vegetais em resposta a metais pesados conhecimento em fitorremediação assistida, janeiro de 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-821199-1.00003-1. No livro: *Remediação de contaminantes ambientais mediada por micróbios* (pp.27-36). Capítulo: 3 Editora: Woodhead Publishing Série em Ciência, Tecnologia e Nutrição de Alimentos). Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

39. Kozai, T. (2010). Photoautotrophic micropropagation - Environmental control for promoting photosynthesis. *Propagation of ornamental plants*. 10. 188-204). Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 29 de agosto de 2025.

BIOTECNOLOGIA NO BRASIL

VOLUME VII



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](#)

Milena Gaion Malosso (Org)
Ivan Monteiro dos Santos (Org)
Ricardo dos Santos Faria (Org)
Natasha Verdaska Meliciano
Eraldo Ferreira Lopes
Vera Lúcia Imbiriba Bentes
Sandriele de Oliveira Ramos
José Vagner Peres Faia
Eriana de Souza Batalha
Julia Kamilly Cordeiro do Nascimento

