Capítulo 34

Fatores que Condicionam a Regeneração de Plantas a Partir de Sementes Sintéticas

Factors Affecting Plant Regeneration from Synthetic Seeds

Jordana Caroline Nagel

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS. http://lattes.cnpq.br/1544914259635851.

Thaís Mariane Bialozur

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS. https://lattes.cnpq.br/9357353982626392

Cibelli Maciel Valença

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo-RS. https://lattes.cnpq.br/0205038502209525

Resumo: A produção de sementes sintéticas representa uma alternativa para a propagação e a conservação de espécies vegetais, mas sua eficiência depende da capacidade dos materiais encapsulados de originar plantas completas. O objetivo desta revisão foi analisar os fatores fisiológicos e tecnológicos que influenciam esse processo, considerando a origem e a competência regenerativa dos propágulos, a composição das matrizes de encapsulamento e as condições de cultivo e armazenamento. Foi realizada uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, abrangendo publicações de 2016 a 2026, com prioridade para estudos experimentais recentes. Os resultados indicaram que a maturação fisiológica dos embriões somáticos e a capacidade de desenvolvimento dos meristemas vegetativos interferem nas respostas posteriores ao encapsulamento. Em Casuarina equisetifolia, o aumento da concentração de alginato de sódio de 4% para 5% reduziu a conversão de 68,6% para 33,6%. Em mandioca (Manihot esculenta), pesquisa publicada em 2026 registrou emergência de até 80,6% com matrizes reticuladas com hidróxido de cálcio, demonstrando a influência da formulação sobre o desenvolvimento das gemas. Durante o armazenamento de embriões encapsulados de Citrus sinensis a 10 °C, a germinação diminuiu de 90% após um mês para 40% após três meses. Em bananeira 'Prata-Anã', a vermiculita favoreceu a conversão inicial, enquanto o meio MS proporcionou maior crescimento posterior. A análise dos estudos mostrou que a emergência de brotos ou a germinação de embriões não assegura, isoladamente, a formação de plantas completas. A avaliação da eficiência dos protocolos deve considerar também o enraizamento, o desenvolvimento vegetativo e a capacidade de estabelecimento após a aclimatização.

Palavras-chave: encapsulamento; alginato de cálcio; competência regenerativa; propagação vegetal; conservação de germoplasma.

Abstract: Synthetic seed production offers an alternative approach to plant propagation and germplasm conservation, but its efficiency depends on the ability of encapsulated plant material to develop into complete plants. This review aimed to analyze the physiological and technological factors influencing this process, considering the origin and regenerative competence of propagules, the composition of encapsulation matrices, and cultivation and storage conditions. A qualitative narrative literature review was conducted, covering publications from 2016 to 2026, with emphasis on recent experimental studies. The findings indicated that the physiological maturation of somatic embryos and the developmental

DOI: 10.47573/aya.5379.3.23.34

capacity of vegetative meristems influence subsequent responses to encapsulation. In Casuarina equisetifolia, increasing the sodium alginate concentration from 4% to 5% reduced the conversion rate from 68.6% to 33.6%. In cassava (Manihot esculenta), a study published in 2026 reported bud emergence of up to 80.6% using matrices cross-linked with calcium hydroxide, demonstrating the influence of matrix formulation on bud development. During storage of encapsulated Citrus sinensis embryos at 10 °C, germination declined from 90% after one month to 40% after three months. In 'Prata-Anã' banana, vermiculite favored initial conversion, whereas MS medium supported greater subsequent growth. Overall, the reviewed studies showed that shoot emergence or embryo germination alone does not ensure the development of complete plants. Protocol efficiency should therefore also be assessed through root formation, vegetative growth, and the ability of regenerated plants to establish successfully following acclimatization.

Keywords: encapsulation; calcium alginate; regenerative competence; plant propagation; germplasm conservation.

INTRODUÇÃO

A produção de sementes sintéticas permite utilizar estruturas vegetais com capacidade regenerativa como unidades de propagação, por meio do encapsulamento em matrizes artificiais. A técnica pode ser aplicada a embriões somáticos, embriões zigóticos e propágulos vegetativos, como segmentos nodais, gemas e ápices caulinares, oferecendo possibilidades de multiplicação e conservação de materiais vegetais. Entretanto, a obtenção de plantas completas depende de características fisiológicas que variam conforme a origem dos tecidos e as condições necessárias à retomada do desenvolvimento. A regeneração de segmentos nodais encapsulados de Mentha spicata em condições não estéreis, descrita por Micheli *et al.* (2022), exemplifica a possibilidade de aplicação da técnica fora dos sistemas convencionais de cultivo in vitro.

As diferenças entre os materiais utilizados estão relacionadas à organização e ao estádio de desenvolvimento das estruturas vegetais. Nos embriões zigóticos, a diferenciação dos polos caulinar e radicular ocorre durante a embriogênese, acompanhada pela formação de tecidos de reserva que contribuem para o crescimento inicial. Os embriões somáticos, embora apresentem organização semelhante, dependem de condições adequadas de indução e maturação para adquirir competência germinativa. Já os propágulos vegetativos possuem meristemas preexistentes, capazes de retomar o crescimento após o encapsulamento, mas a emissão de brotos nem sempre é acompanhada pela formação de raízes funcionais. Essas particularidades interferem nas exigências nutricionais e hormonais de cada material e, consequentemente, nas respostas obtidas durante a regeneração.

A condição fisiológica dos tecidos também pode limitar o desenvolvimento, mesmo quando sua viabilidade é preservada. Em macieira (Malus pumila var. domestica), Choi (2021) investigou o encapsulamento de embriões zigóticos e a influência das reservas cotiledonares e da composição da matriz sobre a germinação. Em propágulos vegetativos, Behera *et al.* (2021) avaliaram a regeneração de

segmentos nodais encapsulados de Paederia foetida, considerando condições nutricionais e hormonais relacionadas à formação de brotos e raízes. Esses estudos permitem compreender que a resposta ao encapsulamento não depende exclusivamente da sobrevivência dos tecidos, mas também de sua capacidade de desenvolver as estruturas necessárias à formação de uma planta.

Além das características do material vegetal, a composição da cápsula interfere nas condições oferecidas à regeneração. O alginato de sódio, associado a íons de cálcio, forma uma matriz hidratada que proporciona proteção física e permite incorporar nutrientes e reguladores de crescimento. Entretanto, as concentrações utilizadas modificam a consistência e a resistência mecânica da estrutura, podendo dificultar a expansão dos tecidos durante a germinação ou a emissão de brotos. Ahmad *et al.* (2022), ao avaliar o encapsulamento de segmentos nodais de Casuarina equisetifolia, demonstraram que alterações na formulação da matriz modificam a resposta regenerativa, indicando a necessidade de ajustar suas propriedades às características do propágulo.

A influência das condições de cultivo torna-se particularmente importante quando as sementes sintéticas são transferidas para substratos ou ambientes não estéreis. Nessas situações, a disponibilidade de água e nutrientes, a aeração e a presença de microrganismos podem modificar o desenvolvimento dos tecidos, exigindo condições adequadas para a continuidade do crescimento. A regeneração em solo, investigada por Micheli *et al.* (2022), mostra que a aplicação da técnica pode ultrapassar o ambiente laboratorial, mas a emergência inicial das estruturas vegetais não assegura, isoladamente, o estabelecimento das plantas.

A conservação dos propágulos encapsulados acrescenta outras exigências fisiológicas, pois a manutenção da integridade das cápsulas não significa necessariamente que os tecidos preservem sua capacidade regenerativa. Alterações decorrentes do período e das condições de armazenamento podem comprometer a retomada do crescimento após a transferência para um ambiente favorável. Mohamed *et al.* (2023), ao investigarem a conservação de embriões somáticos encapsulados de Citrus sinensis, registraram redução da germinação com o prolongamento do armazenamento, demonstrando a importância de considerar a resposta fisiológica do material após a conservação.

A interpretação da eficiência das sementes sintéticas depende, ainda, dos critérios utilizados para caracterizar a regeneração. A protrusão da radícula, a emissão de brotos, o enraizamento e a formação de plantas completas correspondem a etapas distintas do desenvolvimento vegetal, que nem sempre são avaliadas conjuntamente. Dessa forma, percentuais de germinação ou brotação não devem ser interpretados automaticamente como indicadores da obtenção de plantas capazes de manter seu crescimento após a transferência para condições de cultivo.

Considerando essas particularidades, a análise dos fatores fisiológicos e tecnológicos que influenciam a conversão de sementes sintéticas em plantas completas permite relacionar a origem e a competência regenerativa dos propágulos às características das matrizes de encapsulamento e às condições de cultivo e conservação. A discussão contempla as limitações associadas às diferentes etapas

do desenvolvimento vegetal e os critérios utilizados para avaliar a eficiência dos protocolos de propagação.

METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e de caráter descritivo-interpretativo, direcionada à análise dos fatores fisiológicos e tecnológicos que influenciam a conversão de sementes sintéticas em plantas completas. A fundamentação científica reúne estudos sobre o encapsulamento de embriões somáticos, embriões zigóticos e propágulos vegetativos, considerando as particularidades desses materiais e suas respostas durante a regeneração.

O recorte temporal estabelecido compreende publicações de 2016 a 2026, com prioridade para pesquisas originais publicadas entre 2021 e 2026. A escolha dos trabalhos considerou sua relação com a temática e a contribuição dos resultados experimentais para a compreensão das condições que favorecem ou limitam o desenvolvimento dos tecidos encapsulados. Estudos sobre maturação de embriões somáticos e encapsulamento-desidratação também foram utilizados de maneira complementar, por fornecerem informações sobre processos fisiológicos associados à competência regenerativa e à conservação do material vegetal.

A análise contemplou a origem e o estádio de desenvolvimento dos propágulos, a composição das matrizes de encapsulamento, as condições nutricionais e hormonais, os procedimentos de armazenamento e os ambientes de cultivo. Os parâmetros empregados para caracterizar a germinação, a emissão de brotos, o enraizamento e a formação de plantas completas foram examinados considerando as particularidades dos protocolos experimentais, evitando comparações diretas entre percentuais obtidos a partir de critérios distintos.

A seleção das publicações não seguiu procedimentos sistemáticos de identificação e triagem, nem envolveu análise quantitativa dos resultados. A interpretação foi organizada pela relação temática entre os estudos, permitindo discutir as interações entre a condição fisiológica dos propágulos, as características das cápsulas e as exigências necessárias à continuidade do desenvolvimento vegetal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A conversão de sementes sintéticas em plantas completas depende de processos fisiológicos que se iniciam antes do encapsulamento e continuam durante a regeneração e o estabelecimento das plantas. Embora a matriz artificial proporcione proteção física e possa incorporar substâncias necessárias ao crescimento, sua utilização não assegura que os tecidos encapsulados apresentem capacidade regenerativa. A formação de uma planta exige a retomada da atividade metabólica,

a diferenciação ou o crescimento de estruturas vegetativas e o desenvolvimento de um sistema radicular capaz de sustentar as etapas posteriores. Essas exigências variam conforme a natureza do propágulo, seu estádio de desenvolvimento e as condições às quais foi submetido anteriormente.

Nos embriões somáticos, a competência germinativa está relacionada à diferenciação e à maturação fisiológica, processos que podem permanecer incompletos mesmo quando as estruturas apresentam características morfológicas semelhantes às dos embriões zigóticos. Ao investigar a embriogênese somática em jabuticabeira (Plinia cauliflora), Oliveira *et al.* (2022) observaram que a suplementação com polietilenoglicol favoreceu a obtenção de embriões no estádio de torpedo, sem resultar na formação de plântulas. Foram identificadas, ainda, alterações anatômicas possivelmente associadas à exposição ao ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), empregado durante a indução da embriogênese. Embora o experimento não tenha envolvido a produção de sementes sintéticas, seus resultados permitem compreender por que a obtenção de estruturas embrionárias morfologicamente diferenciadas nem sempre é acompanhada de germinação satisfatória.

A maturação adquirida durante a embriogênese, portanto, estabelece condições que não podem ser substituídas apenas pela incorporação de nutrientes à cápsula. Essa limitação assume características distintas quando são utilizados propágulos vegetativos, nos quais a regeneração ocorre a partir de meristemas preexistentes. Nesses materiais, a retomada do crescimento caulinar pode ocorrer sem uma nova etapa de embriogênese, embora a formação de raízes permaneça necessária para a obtenção de plantas completas. A posição e a procedência dos tecidos também interferem nesse processo, conforme observado em Justicia adhatoda, na qual os ápices caulinares apresentaram melhor desempenho que os segmentos nodais submetidos a condições semelhantes de encapsulamento (Rathour *et al.,* 2023).

A utilização de segmentos nodais tem proporcionado respostas regenerativas expressivas em diferentes espécies. Behera *et al.* (2021) obtiveram 83,3% de regeneração em Paederia foetida, com formação de brotos e raízes a partir de materiais encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM. O melhor desempenho ocorreu em meio MS com metade da concentração de sais, suplementado com 0,5 mg L^{-1} de ácido indolacético (AIA), sendo as plantas posteriormente aclimatizadas. Em batata-doce (Ipomoea batatas), a conversão alcançou 99% sob condições específicas de cultivo, também com desenvolvimento das estruturas caulinares e radiculares (Tadda *et al.,* 2022). Apesar dos elevados percentuais, os protocolos empregaram condições nutricionais próprias, impedindo atribuir a regeneração exclusivamente à presença de meristemas diferenciados ou à composição das cápsulas.

A importância de acompanhar o crescimento para além da emissão de brotos pode ser observada em pesquisas que apresentaram respostas distintas entre as estruturas vegetativas. Nas cultivares de mirtilo (Vaccinium corymbosum) ‘Brigitta’ e ‘Duke’, os ápices caulinares encapsulados apresentaram maior viabilidade, comprimento e massa fresca dos brotos em comparação aos segmentos nodais de

diferentes posições. Entretanto, nenhum dos propágulos produziu raízes após 45 dias de cultivo (Regni *et al.,* 2025). Esse comportamento contrasta com o observado em P. foetida e batata-doce, nas quais a regeneração incluiu o desenvolvimento radicular. A diferença entre os materiais mostra que a capacidade de crescimento da parte aérea não permite prever, isoladamente, a formação de plantas completas.

Mesmo entre explantes de natureza semelhante, o histórico de cultivo pode modificar a recuperação posterior. Segmentos nodais de Cannabis sativa provenientes de plantas mantidas in vitro e in vivo foram encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 75 mM. Após 150 dias de armazenamento a 6 °C, sob iluminação, as taxas de recuperação corresponderam a 70% e 90%, respectivamente (Zarei *et al.,* 2022). Como os componentes fisiológicos responsáveis pela diferença não foram avaliados separadamente, não é possível relacioná-la a uma característica específica dos tecidos. Ainda assim, a procedência do material deve ser considerada juntamente com os tratamentos aplicados após a coleta, especialmente em protocolos destinados à conservação de germoplasma.

A influência das características do propágulo também foi examinada em Decalepis arayalpathra, espécie na qual segmentos nodais encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM apresentaram 71,26% de retomada do crescimento em meio MS contendo 5,0 µM de 6-benziladenina, 0,5 µM de ácido naftalenoacético e 20,0 µM de sulfato de adenina. O enraizamento foi favorecido em meio MS com metade da concentração de sais e 2,5 µM de ácido naftalenoacético. Posteriormente, a aclimatização foi examinada sob diferentes densidades de fluxo de fótons fotossintéticos, incorporando à avaliação fatores ambientais relacionados à adaptação das plantas (Ahmad *et al.,* 2025). A separação entre as condições utilizadas para a retomada do crescimento, a formação de raízes e a transferência para o ambiente externo permite compreender a conversão como um processo composto por exigências fisiológicas sucessivas.

Além das propriedades dos tecidos, a composição da matriz interfere diretamente nas condições físicas oferecidas à regeneração. A interação entre o alginato de sódio e os íons de cálcio forma uma estrutura hidratada cuja consistência depende das concentrações empregadas e do procedimento de complexação. A cápsula precisa apresentar resistência suficiente para suportar o manuseio e, simultaneamente, permitir a expansão das estruturas vegetais. O aumento da concentração dos componentes pode modificar essa relação, produzindo matrizes mais consistentes, mas nem sempre adequadas à emergência dos propágulos.

Em Casuarina equisetifolia, a utilização de alginato de sódio a 4% e cloreto de cálcio a 100 mM proporcionou 68,6% de conversão de segmentos nodais. Quando a concentração do polímero foi elevada para 5%, o percentual diminuiu para 33,6%, enquanto o emprego de cloreto de cálcio a 200 mM resultou em 24,4% nas condições correspondentes (Ahmad *et al.,* 2022). Formulações contendo alginato a 4% e cloreto de cálcio a 100 mM também foram utilizadas em batata-doce, ao passo que a regeneração de P. foetida foi obtida com 3% do polímero e a mesma concentração do agente reticulante (Tadda *et al.,* 2022; Behera *et al.,* 2021). Essas diferenças indicam que concentrações semelhantes podem ser empregadas em

materiais distintos, mas não permitem estabelecer uma composição universalmente adequada.

A relação entre consistência da matriz e emergência torna-se particularmente relevante quando as estruturas encapsuladas apresentam exigências diferentes de expansão. Em mandioca (Manihot esculenta), Conceição *et al.* (2026) avaliaram gemas axilares submetidas a concentrações de alginato de sódio entre 0,8% e 6%, utilizando cloreto de cálcio ou hidróxido de cálcio como agentes de reticulação. Nas formulações com cloreto de cálcio, a emergência foi reduzida e chegou a ser completamente inibida quando a concentração de alginato atingiu 4% ou valores superiores. Com hidróxido de cálcio, o percentual alcançou 80,6%, permanecendo abaixo do controle não encapsulado, que apresentou 91,7%. As concentrações entre 0,8% e 1,0% proporcionaram melhor equilíbrio entre a integridade das cápsulas e a emergência das gemas.

A ausência de emergência nas formulações mais concentradas foi relacionada às características estruturais das matrizes, embora propriedades como porosidade, permeabilidade e disponibilidade de oxigênio não tenham sido mensuradas diretamente. Dessa forma, não é possível atribuir o impedimento do crescimento a um mecanismo físico específico. A comparação com C. equisetifolia é especialmente pertinente: enquanto o alginato a 4% associado ao cloreto de cálcio impediu a emergência das gemas de mandioca, a mesma concentração permitiu conversão de 68,6% em C. equisetifolia. Como os materiais, os procedimentos de encapsulamento e os ambientes de cultivo não foram equivalentes, a concentração do polímero deve ser interpretada em associação às demais características de cada protocolo.

A avaliação de diferentes combinações de alginato e cálcio também foi realizada em Stachys byzantina. Kostas *et al.* (2026) empregaram concentrações de 2%, 2,5% e 3% de alginato de sódio, associadas a soluções de cloreto de cálcio de 50, 100, 200 e 400 mM. Além da formação das cápsulas, foram examinadas as respostas dos segmentos caulinares após um, dois e três meses de armazenamento. A investigação reuniu variáveis relacionadas à estrutura da matriz e à recuperação dos tecidos, permitindo avaliar as formulações também quanto à conservação do material vegetal. Esse aspecto amplia a interpretação da resistência das cápsulas, uma vez que sua adequação precisa ser considerada tanto durante a produção quanto nas etapas posteriores de utilização.

A composição da matriz pode ser modificada ainda pela incorporação de nutrientes e reguladores vegetais. Em Crataegus monogyna, segmentos nodais foram encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM, com adição de sais e vitaminas do meio MS. Formulações contendo ou não ácido indolacético foram avaliadas sob diferentes temperaturas e períodos de armazenamento, sendo observadas variações na regeneração conforme as combinações experimentais. Koçak *et al.* (2025) também utilizaram modelos de aprendizado de máquina para examinar a contribuição dessas variáveis, associando a avaliação convencional da recuperação dos propágulos a procedimentos de análise preditiva.

A incorporação de substâncias à cápsula, entretanto, precisa ser interpretada em conjunto com a composição do meio externo. Quando o cultivo ocorre em substratos com disponibilidade nutricional limitada, os componentes presentes na matriz podem contribuir para sustentar o crescimento inicial. Em ambientes enriquecidos, por outro lado, a resposta depende também dos nutrientes e reguladores fornecidos após a semeadura. Em batata-doce, a utilização de sais MS em meia concentração esteve associada a respostas favoráveis, incluindo elevada conversão e menor abscisão foliar em determinadas condições (Tadda *et al.,* 2022). A adequação dessa concentração, contudo, não pode ser estendida automaticamente a outras espécies ou estádios de desenvolvimento.

Essa relação entre o ambiente de cultivo e o crescimento posterior foi investigada em microbrotos encapsulados de bananeira 'Prata-Anã', clone Gorutuba. Aos 30 dias, a vermiculita proporcionou 57% de conversão, sem diferença significativa entre as concentrações de 6-benzilaminopurina (BAP) avaliadas. No meio MS, o desempenho variou conforme a suplementação hormonal, com valor máximo estimado de 55,08% na concentração de 8,22 µmol L^{-1} de BAP, associada a 0,54 µmol L^{-1} de ácido naftalenoacético (ANA). Embora a vermiculita tenha favorecido a conversão inicial, o meio MS proporcionou maior crescimento posterior, incluindo altura e desenvolvimento foliar (Pereira *et al.,* 2017). Assim, o ambiente que apresentou melhor desempenho na primeira avaliação não foi necessariamente aquele que sustentou maior crescimento nas etapas seguintes.

No mesmo experimento, concentrações de BAP superiores a 8,88 µmol L^{-1} não foram adequadas ao crescimento dos microbrotos em meio MS, com redução de determinadas características vegetativas. Como a citocinina foi utilizada em associação ao ANA, os resultados precisam ser interpretados considerando a composição hormonal empregada (Pereira *et al.,* 2017). A resposta aos reguladores também pode ser influenciada por tratamentos anteriores ao encapsulamento, especialmente quando os explantes passam por fases sucessivas de multiplicação e recuperação.

Essa particularidade aparece no protocolo desenvolvido para J. adhatoda, no qual a conversão de ápices encapsulados ocorreu em meio MS líquido sem suplementação hormonal adicional. Os tecidos, entretanto, haviam sido multiplicados anteriormente em meio contendo metatriptofano (Rathour *et al.,* 2023). Portanto, a ausência de reguladores na fase de conversão não permite concluir que o crescimento tenha ocorrido independentemente das condições hormonais precedentes. A distinção entre os tratamentos aplicados em cada etapa é necessária para compreender o desempenho dos propágulos e interpretar adequadamente as exigências do sistema de cultivo.

A utilização de metatopolina também foi investigada em Blepharispermum subsessile, com segmentos nodais assépticos encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM. A maior porcentagem de brotação, correspondente a 100%, foi obtida em meio MS suplementado com 2,0 mg L^{-1} desse regulador. Os brotos foram posteriormente transferidos para meio MS com metade da concentração de sais e 0,5 mg L^{-1} de ácido indolbutírico, visando ao enraizamento,

seguido de aclimatização (Monalisa *et al.,* 2026). Nesse caso, a emissão da parte aérea e a formação de raízes foram conduzidas sob condições nutricionais e hormonais distintas, permitindo acompanhar etapas que não seriam representadas adequadamente por um único percentual de brotação.

Em Mucuna pruriens, a associação entre metatriptofano e putrescina também favoreceu a regeneração de segmentos nodais encapsulados. Alam *et al.* (2026) utilizaram alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM, obtendo 91,60 ± 0,81% de emissão de brotos em meio MS contendo 6,5 µM de metatriptofano e 10,0 µM de putrescina. O enraizamento foi realizado em meio MS com metade da concentração de sais, suplementado com 0,2 µM de ácido indolbutírico. Após a aclimatização, as plantas foram transferidas para condições de campo. A utilização de meios diferentes para a formação da parte aérea e do sistema radicular mostra que o ajuste das condições de cultivo pode ser necessário mesmo após a retomada satisfatória do crescimento.

A influência da suplementação hormonal sobre a conversão também foi examinada em Ruta chalepensis. Segmentos nodais encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM apresentaram 96,8% de conversão após 12 semanas em meio MS contendo 5,0 µM de 6-benziladenina e 0,5 µM de ácido naftalenoacético. Os brotos foram posteriormente submetidos ao enraizamento e à aclimatização (Qahtan; Alatar; Faisal, 2023). Considerados em conjunto, os protocolos de B. subsessile, M. pruriens e R. chalepensis apresentam combinações hormonais distintas, mas compartilham a necessidade de acompanhar a regeneração para além da emissão inicial de brotos.

A possibilidade de armazenar sementes sintéticas acrescenta outra dimensão à avaliação dos protocolos, pois a manutenção da capacidade regenerativa depende da tolerância dos tecidos às condições de conservação. Temperatura, duração do armazenamento, disponibilidade de nutrientes e tratamentos prévios podem modificar a recuperação posterior, mesmo quando a integridade das cápsulas é preservada. Em laranjeira-doce (Citrus sinensis), embriões somáticos cotiledonares encapsulados em alginato de sódio a 3% foram mantidos a 10 °C, apresentando germinação de 90% após um mês, 62,5% aos dois meses e 40% ao final de três meses (Mohamed *et al.,* 2023). Os percentuais mostram redução da capacidade germinativa com o prolongamento da conservação, sem permitir determinar os mecanismos fisiológicos responsáveis por essa perda.

Alterações observadas durante o armazenamento podem fornecer informações complementares à germinação. Em Iris pallida, Meucci *et al.* (2024) encapsularam embriões somáticos em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 100 mM, submetendo-os a períodos de 14 e 28 dias, sob temperaturas de 4 °C e aproximadamente 23 °C. Após a transferência para meio de germinação, foram avaliados o escurecimento dos embriões, a formação de plântulas e a emissão de novos brotos. O período de 28 dias esteve associado ao maior escurecimento dos tecidos, enquanto a conservação por intervalos menores apresentou danos menos intensos. A inclusão dessas avaliações permite distinguir alterações visíveis no material encapsulado das respostas obtidas após sua transferência para condições favoráveis.

Nos propágulos vegetativos, a conservação pode envolver procedimentos destinados a restringir o crescimento sem comprometer a recuperação. Em aspargo (Asparagus officinalis), ápices caulinares encapsulados em alginato de sódio a 3% e cloreto de cálcio a 0,1 M receberam diferentes concentrações de paclobutrazol ou cloreto de clormequate. Após armazenamento a 4 °C por até 24 semanas, a incorporação de 1,0 mg L^{-1} de paclobutrazol favoreceu a obtenção de plantas completas, posteriormente enraizadas e aclimatizadas em casa de vegetação (Sallam *et al.,* 2023). A utilização de reguladores de crescimento na matriz representa, nesse caso, uma estratégia voltada à conservação, diferentemente dos tratamentos empregados para estimular diretamente a multiplicação da parte aérea.

Outra abordagem foi utilizada em J. adhatoda, cujos ápices encapsulados permaneceram durante 60 dias em meios com menor disponibilidade de sacarose ou concentração reduzida de sais MS. Após a transferência para condições de recuperação, mais de 50% dos materiais originaram plantas nos tratamentos relatados (Rathour *et al.,* 2023). Em P. foetida, a germinação de segmentos nodais armazenados a 4 °C durante 21 dias foi de 63,3%, abaixo dos 83,3% obtidos nas condições mais favoráveis de cultivo sem conservação (Behera *et al.,* 2021). Embora os procedimentos tenham diferido quanto ao período, à temperatura e à composição dos meios, ambos permitem examinar a recuperação após a exposição a condições destinadas à manutenção dos propágulos.

A refrigeração, entretanto, não apresenta efeitos uniformes entre as espécies. Em B. subsessile, a conservação durante oito semanas a 25 °C proporcionou 63,3% de brotação, enquanto os materiais mantidos a 4 °C apresentaram 36,7% (Monalisa *et al.,* 2026). Em quatro variedades de nogueira (Juglans regia), ápices caulinares encapsulados foram armazenados a 25 °C e 8 °C, com ou sem desidratação prévia em solução de sacarose. Os materiais mantiveram capacidade de originar plantas por até quatro meses a 25 °C e três meses e meio a 8 °C, sem necessidade de subcultivos, embora as respostas variem conforme a variedade e o tratamento empregado (Sota *et al.,* 2023). Esses resultados não permitem definir uma temperatura ideal comum às espécies, mas mostram que a conservação pode ser alcançada sob diferentes condições térmicas.

O tipo de explante também interfere na recuperação após períodos prolongados. Em Ficus palmata, os ápices caulinares encapsulados apresentaram maior capacidade de retomada do crescimento do que os segmentos nodais, alcançando 65% após cinco meses de armazenamento refrigerado. O protocolo incluiu a avaliação da fidelidade genética das plantas recuperadas, com elevada uniformidade nos materiais examinados (Al-Aizari *et al.,* 2025). A associação entre o desempenho regenerativo e a qualidade genética é particularmente relevante quando o armazenamento se destina à manutenção de materiais clonais por períodos prolongados.

A estrutura das cápsulas pode igualmente ser modificada para atender às exigências de conservação. Em Salix tetrasperma, Reshi *et al.* (2025) investigaram o encapsulamento em duas camadas de alginato e obtiveram 93,6% de retomada do crescimento após oito semanas em meio MS suplementado com

5,0 µM de metatriptofano e 0,5 µM de ácido naftalenoacético. A dupla cobertura também apresentou melhor desempenho durante o armazenamento a 4 °C em comparação às cápsulas de camada única. Após a aclimatização, 82% das plantas se estabeleceram em casa de vegetação. Nesse protocolo, a modificação física da matriz foi acompanhada de avaliações posteriores à recuperação, permitindo relacionar o procedimento de encapsulamento ao desenvolvimento das plantas regeneradas.

Além dos percentuais de recuperação, a análise de alterações fisiológicas pode contribuir para compreender os efeitos da conservação. Alam *et al.* (2026) investigaram segmentos nodais de M. pruriens encapsulados e não encapsulados, armazenados a 4 °C por até 70 dias. Durante a recuperação e a aclimatização, foram examinados pigmentos fotossintéticos, indicadores de estresse oxidativo e atividades de enzimas antioxidantes. Esses parâmetros permitem avaliar respostas que não são representadas apenas pela emissão de brotos, embora sua utilização não signifique que o encapsulamento tenha eliminado os efeitos do armazenamento. A interpretação depende das diferenças observadas entre os tratamentos e das condições às quais os tecidos foram submetidos.

Quando a conservação envolve desidratação e exposição a temperaturas extremamente baixas, as exigências fisiológicas tornam-se ainda mais específicas. Silveira e Sibov (2019) avaliaram o encapsulamento-desidratação de ápices caulinares de cagaiteira (Eugenia dysenterica) e obtiveram 55,55% de regeneração em materiais não criopreservados, submetidos a sacarose a 0,25 M e uma hora de desidratação. Após a criopreservação, não houve recuperação dos ápices nas condições testadas. Embora os autores tenham considerado a possibilidade de alterações nas membranas celulares, essa hipótese não foi confirmada por avaliações específicas. A tolerância ao tratamento de desidratação, portanto, não assegurou a sobrevivência ao procedimento completo de congelamento e descongelamento.

O encapsulamento-desidratação não corresponde à produção convencional de sementes sintéticas destinadas à semeadura, mas permite examinar limitações fisiológicas associadas à conservação de tecidos encapsulados. A matriz pode facilitar o manuseio e a aplicação dos tratamentos, sem que sua integridade física represente necessariamente a condição celular do material vegetal. Por essa razão, a recuperação precisa ser avaliada diretamente, sobretudo quando os procedimentos envolvem perda de água ou temperaturas capazes de comprometer a viabilidade dos tecidos.

A transferência das sementes sintéticas para ambientes não estéreis acrescenta fatores relacionados às características do substrato, à disponibilidade de água e nutrientes e à presença de microrganismos. Em Mentha spicata, nós de estolões provenientes de plantas cultivadas em condições não assépticas foram encapsulados e semeados diretamente em solo, alcançando 56,7% de conversão na ausência de tiofanato-metílico (Micheli; Regni; Silva, 2022). A regeneração nesse ambiente demonstra a possibilidade de utilizar propágulos encapsulados fora do cultivo asséptico, embora o desempenho dependa das exigências fisiológicas do

material e da compatibilidade entre a formulação e as condições externas.

A incorporação de compostos destinados ao controle microbiológico também pode interferir na regeneração. No experimento com M. spicata, concentrações de 100 e 200 mg L^{-1} de tiofanato-metílico reduziram a conversão para 30,0% e 33,3%, respectivamente (Micheli; Regni; Silva, 2022). Em batata (Solanum tuberosum), por outro lado, Kalsoom *et al.* (2023) avaliaram segmentos uninodais com primórdios radiculares encapsulados em alginato de sódio a 3,5%, com adição de carvão ativado e diferentes concentrações do mesmo fungicida. O tratamento com 150 mg L^{-1} apresentou os melhores resultados entre as formulações examinadas, considerando a viabilidade e o crescimento vegetativo. Após 45 dias de armazenamento a 4 °C, a sobrevivência foi de 63,33%, diminuindo para aproximadamente 43,03% aos 60 dias.

As respostas obtidas nas duas espécies diferiram quanto à utilização do tiofanato-metílico, mas os protocolos também apresentaram diferenças na composição das cápsulas, na origem dos propágulos e nas condições experimentais. Não é possível, portanto, atribuir a variação exclusivamente à sensibilidade dos tecidos ao fungicida. A comparação indica a necessidade de avaliar a compatibilidade dos componentes incorporados à matriz, considerando tanto a finalidade sanitária quanto seus possíveis efeitos sobre o crescimento vegetal.

A escolha do substrato acrescenta outra variável ao estabelecimento das plantas. Enquanto a semeadura direta de M. spicata em solo permitiu a regeneração em ambiente não estéril, o cultivo de microbrotos encapsulados de bananeira mostrou diferenças entre a conversão inicial em vermiculita e o crescimento posterior em meio MS (Micheli; Regni; Silva, 2022; Pereira *et al.,* 2017). Como os materiais e as condições de cultivo foram distintos, os percentuais não devem ser comparados diretamente. Ainda assim, os estudos permitem examinar como o ambiente utilizado após o encapsulamento interfere em diferentes fases do desenvolvimento.

A formação de raízes funcionais assume importância particular durante a transição do cultivo asséptico para condições externas. A elevada umidade e a disponibilidade relativamente constante de nutrientes nos sistemas in vitro podem reduzir algumas exigências impostas ao sistema radicular, enquanto a transferência para substratos exige maior capacidade de absorção e ajustes fisiológicos da parte aérea. Em P. foetida, o enraizamento e a aclimatização foram acompanhados após a regeneração dos segmentos nodais (Behera *et al.,* 2021). A adaptação de plantas de C. sativa obtidas a partir de propágulos encapsulados também foi examinada após o desenvolvimento radicular (Zarei *et al.,* 2022). Essas etapas fornecem informações sobre a manutenção do crescimento em condições distintas daquelas utilizadas para a recuperação inicial.

Para protocolos destinados à multiplicação clonal e à conservação de germoplasma, a qualidade das plantas regeneradas pode ser examinada também quanto à uniformidade genética. Ahmad *et al.* (2022) utilizaram marcadores RAPD e ISSR para avaliar materiais de C. equisetifolia obtidos por propagação in vitro, registrando padrões monomórficos. A ausência de diferenças detectáveis pelos

marcadores empregados sustenta a homogeneidade nos segmentos genômicos analisados, sem permitir afirmar estabilidade genética absoluta.

A avaliação molecular também foi incorporada aos protocolos de B. subsessile e M. pruriens. No primeiro caso, marcadores ISSR foram utilizados para examinar plantas provenientes de sementes sintéticas recém-produzidas e armazenadas, juntamente com análises da composição fitoquímica (Monalisa *et al.,* 2026). Em M. pruriens, dez iniciadores ISSR produziram padrões monomórficos nas plantas regeneradas (Alam *et al.,* 2026). A análise genética complementa as avaliações morfológicas e fisiológicas, embora alterações não detectadas pelas técnicas empregadas não possam ser descartadas.

A interpretação conjunta dessas pesquisas requer atenção aos critérios utilizados para caracterizar a conversão. Alguns protocolos quantificaram a germinação de embriões ou a emergência de gemas, enquanto outros acompanharam a emissão de brotos, o enraizamento e a aclimatização. Na mandioca, por exemplo, foram avaliados a emergência e o vigor inicial das gemas encapsuladas em condições ex vitro (Conceição *et al.,* 2026). Já os estudos com M. pruriens e B. subsessile incluíram fases posteriores do desenvolvimento, permitindo acompanhar a formação de raízes e a adaptação das plantas (Alam *et al.,* 2026; Monalisa *et al.,* 2026). Percentuais semelhantes podem, portanto, representar respostas biológicas distintas, limitando comparações fundamentadas apenas nos valores apresentados.

A diversidade de procedimentos empregados antes e depois do encapsulamento também dificulta a identificação isolada dos fatores responsáveis pelo desempenho regenerativo. A procedência dos explantes, os tratamentos hormonais prévios, as concentrações de alginato e cálcio, a composição do meio de cultivo e as condições de armazenamento variaram entre os trabalhos. Quando essas variáveis não são examinadas de maneira independente, a interpretação precisa considerar o conjunto das condições experimentais, evitando atribuir a resposta observada a um único componente.

Embora os estudos analisados apresentem avanços na regeneração de diferentes materiais encapsulados, a padronização dos critérios de avaliação permanece limitada. A descrição das condições anteriores ao encapsulamento, dos tratamentos empregados e das respostas obtidas após o cultivo ou a conservação permite identificar em quais etapas ocorrem as restrições ao desenvolvimento. Nos protocolos destinados à obtenção de plantas completas, o acompanhamento do enraizamento e do estabelecimento após a aclimatização oferece uma avaliação mais abrangente do que a quantificação isolada da germinação ou da brotação, permitindo distinguir a retomada inicial do crescimento da capacidade de manutenção das plantas em condições externas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos analisados indicaram que a resposta dos propágulos encapsulados varia conforme a origem dos tecidos, seu estádio de desenvolvimento e as condições

de cultivo. A maturação dos embriões somáticos e a capacidade de crescimento dos meristemas vegetativos interferem na formação de plantas completas. As diferenças observadas entre as formulações de alginato e os agentes de reticulação também mostram que a mesma composição pode apresentar resultados distintos entre espécies. Além disso, as condições que favorecem a germinação ou a emissão inicial de brotos nem sempre são suficientes para sustentar o enraizamento e o crescimento posterior. Durante o armazenamento, a preservação das cápsulas não assegura a manutenção da capacidade regenerativa dos tecidos.

A comparação entre os protocolos foi limitada pela utilização de diferentes critérios para caracterizar a conversão. Enquanto alguns estudos avaliaram a germinação ou a emissão de brotos, outros acompanharam o enraizamento e a aclimatização. Essas respostas não devem ser consideradas equivalentes, pois representam etapas distintas do desenvolvimento vegetal. Assim, a avaliação da eficiência das sementes sintéticas deve considerar as respostas efetivamente obtidas em cada etapa, permitindo distinguir a retomada inicial do crescimento da formação de plantas capazes de se estabelecer após a transferência para condições externas.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Z.; BABICH, O.; SUKHIKH, S.; YADAV, V.; RAMAKRISHNAN, M.; FIRDAUS, F.; SHAHZAD, A. Unlocking the biotechnological potential of Decalepis arayalpathra: exploring synthetic seed production, metabolic profiling, genetic stability, and the impact of photosynthetic photon flux density on acclimatization. **BMC Plant Biology**, v. 25, art. 189, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-025-06174-w

AHMAD, Z.; YADAV, V.; SHAHZAD, A.; EMAMVERDIAN, A.; RAMAKRISHNAN, M.; DING, Y. Micropropagation, encapsulation, physiological, and genetic homogeneity assessment in Casuarina equisetifolia. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 905444, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.905444.

AL-AIZARI, A. A.; DEWIR, Y. H.; AL-OBEED, R. S.; SALLAM, M.; ALMUTAIRI, K. F.; AL-DOSS, A. In vitro conservation through cold storage and genetic fidelity of the recovered Fegra fig (Ficus palmata Forssk.) micropropagated plantlets. **South African Journal of Botany,** v. 184, p. 319–328, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.06.010

ALAM, N.; ANSARI, F. A.; HUSAIN, F. M.; KUMAR, A.; KHAN, M. H.; ANIS, M. Artificial seed-mediated micropropagation of Mucuna pruriens L. (DC) and its novel antibiofilm potential against MDR ESKAPE pathogens. **Scientific Reports**, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-026-57963-8.

BEHERA, B.; BEHERA, S.; SHASMITA; MOHAPATRA, D.; BARIK, D. P.; NAIK, S. K. Regeneration of plants from alginate-encapsulated axenic nodal segments of Paederia foetida L. – A medicinally important and vulnerable plant species.

Journal of Plant Biotechnology, v. 48, n. 4, p. 255–263, 2021. DOI: https://doi.org/10.5010/JPB.2021.48.4.255.

CHOI, P. S. Development of artificial seeds by encapsulation of zygotic embryo of apple (Malus pumila var. domestica). **Korean Journal of Plant Resources**, v. 34, n. 1, p. 59–63, 2021. DOI: https://doi.org/10.7732/kjpr.2021.34.1.059.

CONCEIÇÃO, L. V. da; CORTES, D. F. M.; CAMPOS, M. de S.; ASSIS, L. L. R. de; JESUS, A. P. G. de; SOUZA, F. de A.; OLIVEIRA, E. J. de. Development and evaluation of a synthetic seed system for cassava propagation. **PLOS ONE,** v. 21, n. 8, art. e0356235, 2026. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0356235.

KALSOOM, T.; AHMED, T.; KHAN, M. A.; HASANUZZAMAN, M.; AHMED, M.; WERBROUCK, S. P. O. In vitro synthetic seed production of potato under different fungicide levels and storage intervals. **Phyton-International Journal of Experimental Botany,** v. 92, n. 8, p. 2429–2450, 2023. DOI: https://doi.org/10.32604/phyton.2023.030846

KOÇAK, M.; YILMAZ, M. C.; KUZGUN, C.; SIRKE, S. T.; YILDIZ, M. Synthetic seed production in Crataegus monogyna L. and prediction of regeneration of synthetic seeds with machine learning algorithms. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 161, art. 22, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11240-025-03049-8

KOSTAS, S.; KATSANOU, C. E.; BERTSOUKLIS, K.; HATZILAZAROU, S. Exploring the optimal encapsulation matrix for artificial seed production to enhance the ornamental exploitation of Stachys byzantina K. Koch. **Horticulturae**, v. 12, n. 3, art. 378, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae12030378

MEUCCI, A.; GHELARDI, C.; CHIETERA, G.; MENSUALI, A. Synthetic seed production and slow growth storage of in vitro cultured plants of Iris pallida Lam. **Horticulturae**, v. 10, n. 3, art. 272, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae10030272

MICHELI, M.; REGNI, L.; SILVA, D. F. da. Encapsulation in calcium alginate of nodes from stolons of Mentha spicata L. **Horticulturae**, v. 8, n. 5, art. 456, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae8050456.

MOHAMED, A. E.-S.; GOMAA, A. H.; ABD-EL-ZAHER, M. H.; REDA, A. E.-S. A.-E.-H.; GIRGIS, N. D. Protocol for plant regeneration from encapsulated somatic embryos of Citrus sinensis L. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 47, art. 101, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s42269-023-01081-2.

MONALISA, K.; BEHERA, S.; PIDIKA, S. P.; NAIK, S. K. Artificial seed production for propagation and germplasm transfer of Blepharispermum subsessile DC., an endemic medicinal plant of India. **Vegetos**, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s42535-026-01845-x.

OLIVEIRA, F. L. R.; SANT'ANNA-SANTOS, B. F.; FRAGA, H. P. F.; DEGENHARDT, J.; QUOIRIN, M. **Embryogenic cultures and somatic embryo development from mature seeds of jabuticaba** (Plinia cauliflora (Mart.) Kausel).

Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 94, n. 4, art. e20201073, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/0001-3765202220201073.

PEREIRA, J. C. G.; ROCHA, S. S.; LONDE, L. C. N.; MOTA, M. C. B. da; ALVES, P. F. S.; VIANA, W. S. Growth of 'Prata-Ana' banana's microshoots clone Gorutuba from synthetic seeds: substrates and BAP concentration. **Revista Brasileira de Fruticultura,** v. 39, n. 5, art. e-892, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-29452017892.

QAHTAN, A. A.; ALATAR, A. A.; FAISAL, M. In vitro regeneration, phytochemical profiling and antioxidant activity in Ruta chalepensis plants established from alginate-encapsulated synthetic seeds. **South African Journal of Botany**, v. 161, p. 575–585, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.065

RATHOUR, R.; YADAV, S.; SINGH, A.; KAUSHIK, S.; RAI, M. K. A liquid culture system for plantlet conversion and slow growth storage of encapsulated shoot tips of Justicia adhatoda L. **Industrial Crops and Products**, v. 205, art. 117534, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117534.

REGNI, L.; CESARINI, A.; CALISTI, S.; PROIETTI, P.; MICHELI, M. Shoots regeneration in Brigitta and Duke blueberry cultivars from different encapsulated vegetative propagules. **Horticulturae**, v. 11, n. 3, art. 259, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae11030259

RESHI, Z. A.; AHMAD, W.; HUSAIN, F. M.; KHANAM, M. N.; JAVED, S. B. Optimizing storage and regeneration of clonal propagules of Salix tetrasperma through double-layered encapsulation. **Horticulturae**, v. 11, n. 5, art. 486, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae11050486

SALLAM, A. R.; HEGAZI, G. A. E.-M.; BEKHEET, S. A. E.-H. Synthetic seeds for in vitro preservation of Asparagus officinalis L. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 47, art. 72, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s42269-023-01043-8

SILVEIRA, A. A. da C.; SIBOV, S. T. Encapsulamento-desidratação de ápices caulinares de Eugenia dysenterica. **Multi-Science Journal**, v. 2, n. 2, p. 39–41, 2019. DOI: https://doi.org/10.33837/msj.v2i2.967.

SOTA, V.; BENELLI, C.; MYRSELAJ, M.; KONGJIKA, E.; GRUDA, N. S. Short-term conservation of Juglans regia L. via synthetic seed technology. **Horticulturae,** v. 9, n. 5, art. 559, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae9050559

TADDA, S. A.; KUI, X.; YANG, H.; LI, M.; HUANG, Z.; CHEN, X.; QIU, D. The response of vegetable sweet potato (Ipomoea batatas Lam.) nodes to different concentrations of encapsulation agent and MS salts. **Agronomy**, v. 12, n. 1, art. 19, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12010019.

ZAREI, A.; FEYISSA, B. A.; DAVIS, B.; TAVAKOULI DINANI, E. **Cannabis synthetic seeds: an alternative approach for commercial scale of clonal propagation and germplasm conservation**. Plants, v. 11, n. 23, art. 3186, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11233186.