

Fisiologia de sementes: Parte I - formação e germinação de sementes

Seed Physiology: Part I - Seed Formation and Germination

Elvis Lima Vieira^{1*} e Zuleide Silva de Carvalho¹

¹ Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Rua Rui Barbosa, 710, Centro, Campus Universitário, CEP: 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, *e-mail: elvieira@ufrb.edu.br

Recebido: 07 setembro 2023;

Aceito: 19 setembro 2023;

Publicado: 20 setembro 2023.

Como citar:

VIEIRA, E. L. CARVALHO, Z. S. de. Fisiologia de sementes: Parte I – formação e germinação de sementes. **Boletim Científico Agrônomo do CCAAB/UFRB**, v. 1, e2259, 2023. Disponível em: <https://ufrb.edu.br/ccaab/boletim-cientifico-agronomico-do-ccaab-volume1/2259-2259-pdf>

Resumo: A semente é um óvulo maduro que desempenha um papel vital na propagação de plantas. A semente contém uma planta em miniatura (eixo embrionário - plântula), com potencial de se desenvolver em uma planta adulta sob condições favoráveis. A germinação, para sementes viáveis e não dormentes, inicia-se com a embebição da semente, ou seja, o processo de reidratação. O processo germinativo consiste em uma sequência ordenada de atividades metabólicas, culminando na retomada do crescimento e desenvolvimento do embrião. A fase inicial envolve a ativação dos processos atenuados nas fases finais da maturação e aumento da atividade respiratória do embrião da semente. A embebição garante a hidratação dos tecidos, ativação, síntese e ação enzimática. Fitohormônios, como giberelinas, auxinas e citocininas desempenham papéis fundamentais na promoção da divisão, alongamento e diferenciação celular do eixo embrionário. Além disso, o fornecimento de oxigênio é essencial para a oxidação das reservas contidas nas sementes, gerando ATP, calor e produtos intermediários necessários para a manutenção e a continuidade do processo germinativo. Ao longo desse processo de crescimento e de desenvolvimento do eixo embrionário que leva à formação de uma planta, a disponibilidade contínua de água é absolutamente indispensável. Este artigo tem como objetivo proporcionar uma visão abrangente dos processos envolvidos na formação e germinação de sementes, enfatizando a importância da embebição, da atividade enzimática e dos fitohormônios nesse contexto, ao mesmo tempo que destaca as exigências críticas de oxigênio e água para o êxito deste aspecto fundamental na vida das plantas.

Palavras chaves: Eixo-embionário. Embebição. Processo germinativo. Fitohormônios.

Abstract: The seed is a mature ovule that plays a pivotal role in plant propagation. Within the seed resides a miniature plant (embryonic axis - cotyledon), with the potential to develop into an adult plant under favorable conditions. Germination, for viable and non-dormant seeds, commences with seed imbibition, i.e., the rehydration process. The germination process entails an ordered sequence of metabolic activities, culminating in the resumption of embryo growth and development. The initial phase involves the reactivation of processes attenuated during the late stages of maturation, accompanied by an increased respiratory activity in the seed embryo. Imbibition ensures tissue hydration, activation, synthesis, and enzymatic action. Phytohormones such as gibberellins, auxins, and cytokinins play fundamental roles in promoting cellular division, elongation, and differentiation within the embryonic axis. Additionally, the supply of oxygen is essential for the oxidation of reserves stored in seeds, generating ATP, heat, and intermediary products necessary for the maintenance and continuity of the germination process. Throughout this process of embryonic growth and development leading to plant formation, the continuous availability of water is absolutely indispensable. This article aims to provide a comprehensive overview of the processes involved in seed formation and germination, emphasizing the significance of imbibition, enzymatic activity, and phytohormones in this context, while highlighting the critical requirements of oxygen and water for the success of this fundamental aspect in plant life.

Keywords: Embryonic Axis. Imbibition. Germination Process. Phytohormones.

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

1. Introdução

A semente representa o ponto culminante das atividades de uma geração e o início de uma nova descendência de uma planta. Ela é, em essência, um óvulo maduro que abriga uma planta em miniatura (eixo embrionário - plântula), conhecida como embrião, com o potencial intrínseco de crescimento e desenvolvimento até atingir o estágio de planta adulta.

As sementes constituem as estruturas fundamentais de propagação das plantas, sendo composta, essencialmente, por três componentes distintos: reservas, tegumento e um embrião, que se manifesta como uma planta em miniatura. Essas estruturas são cruciais para o processo de desenvolvimento que culmina na formação de uma planta adulta. Após o início da germinação, o embrião, presente nas sementes viáveis e não dormentes, entra em um estágio de crescimento e desenvolvimento. A germinação propriamente dita se inicia com a reidratação da semente, um processo denominado embebição, no qual a semente absorve água.

2. Formação da semente

Para uma compreensão mais aprofundada deste processo complexo, é essencial uma breve consideração sobre os órgãos florais da planta, incluindo a microesporogênese (formação do grão de pólen), a macroesporogênese (formação do saco embrionário), a polinização, a fertilização e a formação da semente, também conhecida como embriogênese.

- a) **Estruturas florais:** a flor é um ramo modificado, cujas folhas foram adaptadas para desempenharem funções além da fotossíntese, servindo a propósitos reprodutivos. Uma flor completa organiza os verticilos florais de maneira concêntrica em um receptáculo floral, que inclui sépalas, pétalas, estames e carpelos. O cálice é composto pelas sépalas, enquanto a corola engloba as pétalas. O androceu, o órgão masculino da flor, é composto pelos estames, e o gineceu, o órgão feminino, é constituído pelos pistilos. Estames e carpelos carregam as estruturas reprodutivas fundamentais e estão posicionados acima das pétalas. Cada estame é composto por um filete, conectivo e antera, que pode abrigar de uma a quatro sacos polínicos, contendo grãos de pólen. O carpelo, localizado no centro da flor, é constituído pelo estilete, uma parte mediana alongada pela qual tubo polínico crescerá, e pelo ovário, uma parte basal alargada que eventualmente se transforma no fruto. Os óvulos se desenvolvem na superfície interna do ovário, em uma área chamada placenta.
- b) **Microesporogênese (formação do grão de pólen):** a antera produzirá micrósporos no interior dos seus esporângios e inúmeras células-mães de micrósporos, diploides (2n). Essas células passam por meiose, gerando muitos micrósporos (tétrades) haploides (n). Esses micrósporos germinam na antera, dando origem aos gametófitos masculinos. O gametófito masculino, ou grão de pólen, é extremamente simples, composto por apenas duas células: uma vegetativa, responsável pela formação do tubo polínico, e outra germinativa, que originará dois núcleos gaméticos (n).

O grão de pólen é envolto por duas membranas protetoras: a exina e a intina. Em um determinado momento, a antera se rompe, liberando os grãos de pólen, que podem ser transportados por agentes polinizadores para o estigma da mesma flor ou de outra da mesma espécie.

- c) **Macroesporogênese (formação do saco embrionário):** dentro do óvulo, uma célula-mãe (2n) divide-se por meiose, resultando quatro células haploides (n), das quais três degeneram e apenas a maior se diferencia em um megásporo funcional. Esse megásporo encontra-se imerso no tecido do óvulo e sofre três mitoses sucessivas sem citocineses. Como resultado, oito núcleos são formados e distribuídos dentro do óvulo. Três migram para o polo próximo à abertura do óvulo (micrópila), onde originaram três células: a oosfera no centro e as sinérgidas nas laterais. Outros três núcleos migram para o polo oposto e organizam três células antípodas. Os dois restantes permanecem isolados no centro. O gametófito feminino, composto por sete células, é denominado de saco embrionário, uma vez que abrigará um embrião.
- d) **Polinização:** é a transferência do grão de pólen (n) da antera para o estigma. O grão de pólen germina no estigma, dando origem ao tubo polínico, uma célula vegetativa que se desenvolve ao longo do estilete. Dos dois núcleos presentes no grão de pólen, o núcleo germinativo realiza mitose e origina dois núcleos gaméticos (n), enquanto o núcleo vegetativo se degenera. Ao atingir o saco embrionário, um dos núcleos (n) fecunda a oosfera e origina o zigoto (2n), que formará o embrião. O outro núcleo (n) fecunda os dois núcleos (n) isolados no centro do saco embrionário, resultando em uma célula triploide (3n). Este fenômeno é conhecido como dupla fertilização. Em dicotiledôneas, o embrião é composto por um eixo embrionário e dois cotilédones, que servem como estruturas de reserva. O eixo embrionário consiste em três partes: o epicótilo ou plúmula, a radícula e o hipocótilo. Em monocotiledôneas, o embrião possui um eixo embrionário e um cotilédone, também chamado de escutelo ou escudete, que entra em contato com o endosperma. O epiblasto, localizado na extremidade oposta, é o precursor do segundo cotilédone. O eixo embrionário compreende a plúmula ou epicótilo, envolta pelo coleóptilo, enquanto a radícula é envolvida pelo coleoriza na extremidade inferior.
- e) **Embriogênese (desenvolvimento da semente):** o desenvolvimento da semente engloba uma série de processos que se estendem desde a fertilização do óvulo até a maturação da semente, representando a formação de uma nova planta em miniatura no interior da semente. Esse processo pode ser dividido em três fases: divisão celular, expansão celular e dessecação:
- 1) **Divisão celular:** essa fase envolve rápida divisão celular por meio de mitoses, início da diferenciação e expansão celular, início da síntese protéica, produção de RNAm e início da endoduplicação do DNA;

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

- II) **Expansão celular:** continuação da endoduplicação do DNA, acúmulo de reservas, síntese de amido, proteínas e lipídios, expansão e diferenciação celular;
- III) **Dessecamento:** essa fase deve ocorrer de maneira lenta e controlada para evitar danos às membranas. Durante essa etapa, ocorre a perda de polissomos e a máxima síntese de proteínas de reservas e amido.
- f) **Maturação:** após a fertilização do óvulo, uma série de transformações físicas, químicas, biológicas e morfológicas ocorre no ovário da flor, culminando na formação de uma semente madura capaz de gerar uma nova planta. Durante essas transformações, a semente atinge seu ponto máximo de peso em matéria (massa) seca (PMS). O máximo vigor e a máxima germinação são alcançados no ponto de máxima maturidade fisiológica. Entre as transformações mais importantes, sob o ponto de vista da análise de sementes, destacam-se: **a)** mudanças na umidade; **b)** modificação no tamanho; **c)** no peso seco (massa seca); **d)** no poder de

germinação e **e)** no vigor. A maturação tem seu início quando o embrião atinge seu tamanho máximo e a deposição de reservas é concluída. Na plena maturação, a semente se torna independente da planta-mãe. Durante a criptobiose, um período de repouso fisiológico que sementes ortodoxas experimentam após sua completa formação (estádios finais da maturação), podem ocorrer dois tipos de latência (Figura 1):

- a) **Dormência:** é causada pela presença de um ou mais fatores intrínsecos à própria semente, como inibidores, impermeabilidade tegumentar e imaturidade. A semente viável apresenta mecanismos de bloqueios para à germinação;
- b) **Quiescência:** resulta de ausência de um ou mais fatores extrínsecos, como oxigênio, água, temperatura e luz, necessários para iniciar do processo de germinação da semente.

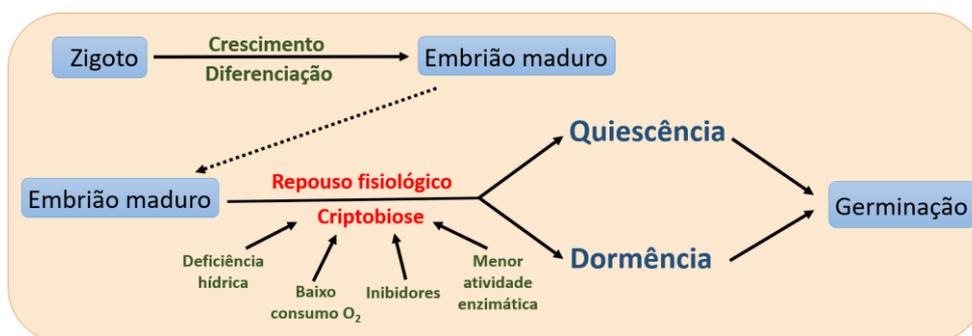


Figura 1. Representação da sequência de eventos que caracterizam o repouso (latência: dormência ou quiescência) pós-maturidade da semente. **Fonte:** Marcos Filho (2005).

As principais modificações que ocorrem na maturação são:

- a) **Teor de umidade da semente:** após a fertilização do óvulo, ocorre um aumento na umidade de 80% a 90%. A partir deste ponto, a umidade começa a diminuir sob o controle da planta, enquanto o ambiente influencia apenas na velocidade da perda. O equilíbrio é alcançado com o ambiente circundante apresentando entre 14% a 20% de umidade. A partir desse ponto, o ambiente passa a influenciar diretamente o teor de umidade da semente.
- b) **Tamanho da semente:** aumenta desde a fertilização até atingir seu tamanho máximo, ainda com muita umidade. Posteriormente, começa a diminuir junto com a transformação de massa seca.
- c) **Peso da semente:** conforme a semente se desenvolve, a massa verde e a massa seca aumentam até um valor máximo. Em seguida, sofrem ligeiro declínio, com uma diminuição mais acentuada na massa seca. Entretanto, neste ponto, ainda há uma quantidade significativa de umidade na semente (40 – 50%). O ponto de máximo peso (massa) seco indica o término do fluxo de substâncias solúveis em direção ao interior da

semente, representando, ao mesmo tempo, o ponto de equilíbrio entre o acúmulo dessas substâncias solúveis na semente e a taxa de respiração.

- d) **Influência no poder germinativo:** o ponto máximo de poder germinativo máximo é atingido pouco antes do ponto de máximo peso em massa seca (PMS).
- e) **Modificação no vigor:** o máximo vigor é alcançado no mesmo ponto que o ponto de máximo peso de massa seca (PMS).

A maturação é um processo complexo, e a maturidade é atingida no final deste processo. A formação da semente e a maturação ocorrem simultaneamente (Figura 2).

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

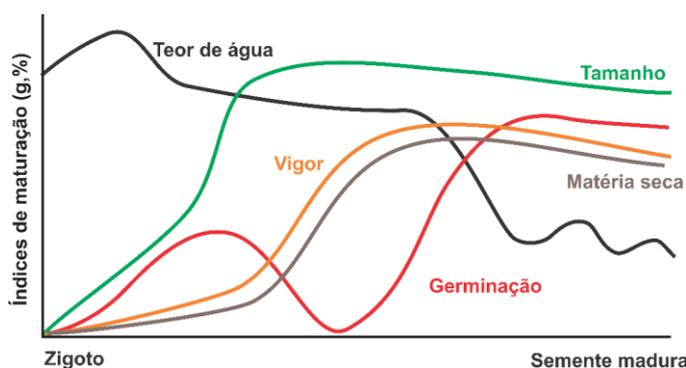


Figura 2. Modificações em algumas características fisiológicas de sementes durante o processo de maturação. **Fonte:** Adaptado de Carvalho e Nakagawa (2000).

3. O processo de germinação de sementes

O processo germinativo pode ser definido como uma sequência ordenada de atividades metabólicas que resultam na retomada do crescimento e de desenvolvimento do embrião, originando uma plântula. De maneira geral, o termo germinação aborda todos os processos envolvidos na transformação do embrião de uma semente (eixo embrionário) em uma plântula independente e estabelecida.

A germinação é o reinício do crescimento do embrião, que teve seu crescimento paralisado nas fases finais da maturação (criptobiose: dormência e quiescência). Os processos bioquímicos e fisiológicos do crescimento do embrião exigem atividades metabólicas aceleradas. A fase inicial da germinação consiste principalmente na ativação daqueles processos atenuados nas fases finais da maturação, pelo aumento do teor de umidade (embebição) e conseqüente aumento da atividade respiratória do embrião da semente.

3.1 Tipos de germinação

- Germinação epigea:** os cotilédones situam-se acima do nível do solo (Figura 3). Ocorre alargamento do hipocótilo, elevando os cotilédones e a gema apical (plúmula) acima do solo (ex: dicotiledôneas em geral, feijão, mamona, amendoim, abóbora, alface, café, algodão e repolho, monocotiledôneas: cebola).
- Germinação hipógea:** os cotilédones permanecem enterrados no solo, e somente a plúmula supera o nível do solo (Figura 3). Não se verifica alargamento no comprimento do hipocótilo, mas sim do epicótilo (ex: gramíneas em geral, milho, arroz, aveia, centeio, cevada, algumas dicotiledôneas: ervilha, seringueira e fava).

3.2 Fases do processo germinativo

A germinação é o resultado de uma série de acontecimentos metabólicos que ocorrem de forma ordenada e sincronizada, desde a absorção de água pela semente até que o início do crescimento da radícula. Podemos distinguir três fases neste processo (Figura 4):

- Fase I - Fase de reidratação – embebição de água pela semente:** Nesta fase, ocorre intensa absorção de água e

aumento proporcional na atividade respiratória da semente. Essa absorção se dá em função do **gradiente de energia livre de água ($\Delta\psi_w$)** estabelecido entre o potencial mátrico da semente e o potencial de água do substrato. Importante notar que a embebição ocorre independentemente da atividade metabólica da semente e pode ocorrer sob diversas condições, como anabólicas, baixas temperaturas, em sementes viáveis ou dormentes, e em tecidos vivos ou não. Dicotiledôneas, por exemplo, podem absorver de 35% a 40% de água a mais em cerca de 1 a 2 horas após o início da embebição, enquanto monocotiledôneas podem aumentar de 25% a 30% no mesmo período. Durante essa fase, ocorre lixiviação de gases e materiais, incluindo açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, e íons de potássio. Além disso, há um aumento na permeabilidade do tegumento às substâncias gasosas, bem como um incremento na taxa de respiração. Também é observada uma considerável ação e atividade enzimática devido ao início da digestão das reservas da semente. Esta fase é caracterizada por uma predominância de processos físicos em relação aos metabólicos.

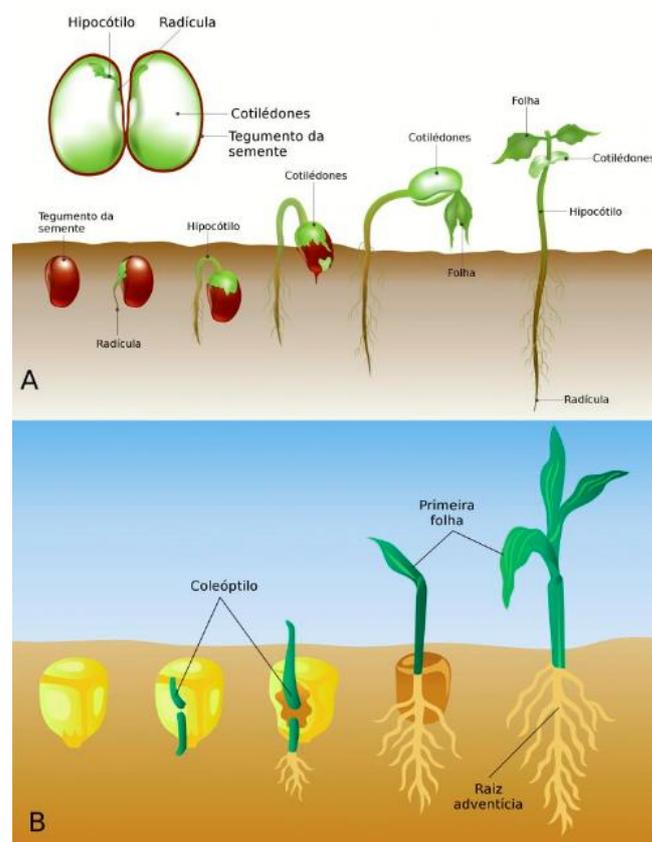


Figura 3. Tipos de germinação de sementes. (A) epigea e (B) hipógea. **Fonte:** Carvalho [s. d.].

- Fase II – Fase de germinação:** ocorrem modificações metabólicas significativas nas sementes, preparando-as para o próximo estágio de crescimento. Há uma drástica redução na taxa de absorção de água (embebição), enquanto a digestão das reservas se intensifica. Nesse

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

período, ocorre também a síntese de novo RNA mensagem (RNAm). Uma característica marcante é a translocação de substâncias mais solúveis, difusíveis e simples em direção aos pontos de crescimento do embrião (eixo embrionário), iniciando o processo de assimilação. Essa fase se caracteriza por uma intensa atividade metabólica e fisiológica, com algumas atividades reversíveis.

- c) **Fase III – Fase de crescimento:** ocorrem modificações morfológicas visíveis nas sementes, como o alongamento da radícula (protusão da raiz primária). Do ponto de vista fisiológico, há um aumento constante na absorção de água e na atividade respiratória. Tanto a respiração quanto a absorção de água pelas sementes aumentam na fase I, estabilizam-se na fase II e voltam a aumentar na fase III.

Durante essa etapa, ocorre a mobilização das reservas e um crescimento mais pronunciado. Esta fase é caracterizada por uma intolerância à dessecação e é irreversível; a semente origina uma nova plântula ou morrerá.

Em resumo, do ponto de vista fisiológico e físico-bioquímico, essas fases envolvem: embebição de água (rehidratação), absorção de oxigênio, aumento na atividade respiratória, formação de hormônios vegetais e enzimas, atividade enzimática, digestão das reservas, mobilização e transporte das reservas, assimilação metabólica, alongamento e crescimento celular, diferenciação dos tecidos, protusão da raiz primária e emergência da plântula (Figuras 4A, 4B e 4C).

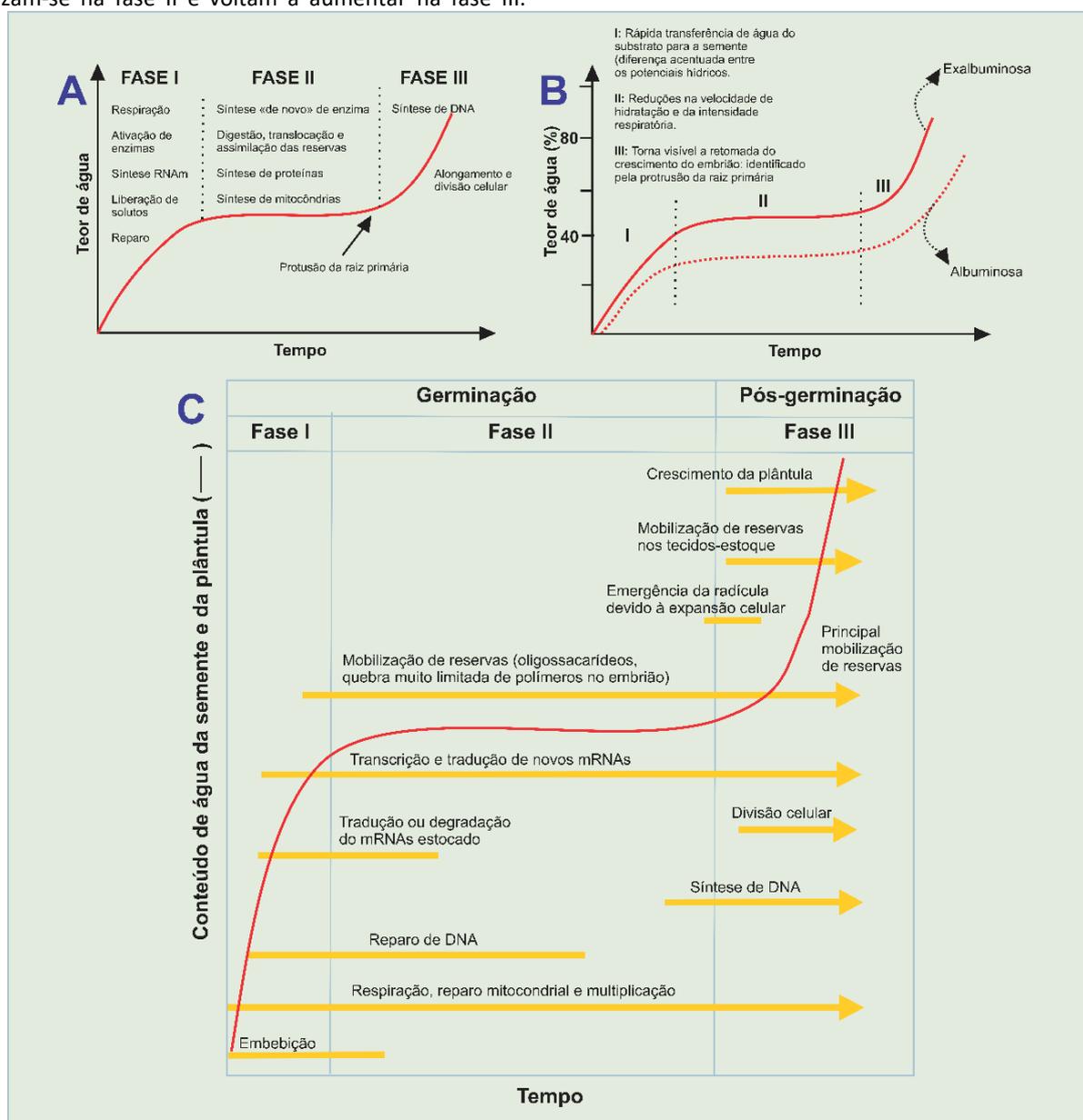


Figura 4. (A) Principais eventos metabólicos que caracterizam a germinação de sementes (adaptado de Bewley, 1997); (B) padrão trifásico de absorção de água pelas sementes durante o processo de germinação (Fonte: Bewley e Black, 1978); (C) fases da embebição das sementes. Fonte: Taiz et al. (2017).

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

3.3 Condições necessárias à germinação da semente

Para que ocorra a germinação de sementes de forma bem-sucedida, diversas condições são fundamentais:

- a) **Viabilidade da semente:** A semente quiescente deve ser viável, ou seja, deve ter a capacidade de germinar quando colocada em condições favoráveis;
- b) **Ausência de dormência:** É crucial que a semente não esteja dormente, pois sementes dormentes são vivas, mas não viáveis para a germinação;
- c) **Condições ambientais adequadas:** As condições ambientais devem ser propícias, incluindo a presença de **água, oxigênio, água, temperatura e para sementes fotoblásticas positivas, luz;**
- d) **Sanidade da semente:** A semente deve estar livre de agentes patógenos que possam comprometer o processo de germinação;
- e) **Vitalidade e viabilidade da semente:** A semente deve estar viva e não dormente para que a germinação seja bem-sucedida.

3.4. Fatores que afetam a germinação de sementes

A germinação das sementes é um processo complexo influenciado por diversos fatores, incluindo a disponibilidade de água, a temperatura ambiente, a presença de oxigênio e a exposição à luz. Cada um desses elementos desempenha um papel crucial na regulação e no desencadeamento desse importante evento na vida das plantas.

3.4.1 Água

A água desempenha um papel essencial na reativação das atividades metabólicas do embrião, principalmente no que diz respeito à respiração. A entrada de água nas sementes é desencadeada pelo gradiente de potencial hídrico estabelecido entre a semente e o substrato. O processo de embebição ocorre por difusão da água e está intrinsecamente ligado às características coloidais das matrizes presentes na semente, permitindo que a água seja absorvida tanto em estado líquido quanto na forma de vapor.

Durante o processo de germinação, a água desempenha múltiplas funções cruciais, incluindo o amolecimento do tegumento, o aumento do volume do embrião e dos tecidos de reserva, a facilitação da ruptura do tegumento devido ao aumento da pressão hidrostática interna, a promoção da difusão gasosa de oxigênio e dióxido de carbono. Ela também favorece a emergência da radícula, o estímulo à síntese de enzimas e hormônios vegetais, como o ácido giberélico.

Além disso, a água desempenha um papel fundamental na produção de hormônios como giberelina, auxina e citocinina, bem como de substratos, como açúcares simples, aminoácidos e ácidos graxos, necessários para a respiração e o crescimento do embrião. Ela também contribui para a diluição do protoplasma celular, na manutenção da estabilidade das membranas celulares, na translocação de solutos e na assimilação e crescimento do embrião.

É relevante observar que a velocidade de embebição pelas sementes varia consideravelmente, dependendo de diversos fatores, como a **espécie** em questão, a **permeabilidade do tegumento**, a **disponibilidade de água**, a **temperatura**, a **pressão hidrostática**, a **área de contato entre a semente e a água**, as forças intermoleculares, a composição química da semente e sua condição fisiológica. Essa velocidade está diretamente relacionada com a percentagem e a uniformidade de germinação, destacando ainda mais a importância desse processo fundamental na germinação das sementes.

A velocidade de embebição pelas sementes varia consideravelmente de acordo com diversos fatores. Primeiramente, a espécie da semente desempenha um papel significativo. Isso ocorre porque o tamanho do embrião, o volume do embrião em relação ao volume total da semente, a estrutura da cobertura protetora e a composição química do tegumento podem variar amplamente entre diferentes espécies. Além disso, a permeabilidade do tegumento da semente é fundamental. Dependendo da estrutura e do tipo de impregnações presentes, como lignina, gorduras, suberina e tanino, a absorção de água pode ser dificultada.

A disponibilidade de água no ambiente também influencia a velocidade de embebição. A presença de água em condições aeróbicas favorece o processo de embebição, permitindo que as sementes absorvam água mais rapidamente. Além disso, a temperatura desempenha um papel importante. Dentro de certos limites, temperaturas mais elevadas geralmente resultam em maiores velocidades de embebição, devido ao aumento da energia cinética das moléculas e da atividade metabólica da semente.

A pressão hidrostática, por sua vez, age de maneira inversa à velocidade de embebição. Quanto maior a pressão hidrostática, menor a velocidade de absorção de água. A área de contato entre a semente e a água também é proporcional à velocidade de embebição; uma maior área de contato permite uma absorção mais rápida de água. As forças intermoleculares, de natureza eletrostática, influenciam a relação hídrica entre a semente (potencial mátrico) e o substrato (potencial osmótico e potencial mátrico).

Por fim, a condição fisiológica da semente desempenha importante papel. Sementes imaturas e deterioradas tendem a absorver água mais rapidamente devido à maior permeabilidade das membranas. Portanto, uma série de fatores interdependentes regula a velocidade de embebição das sementes, afetando diretamente a percentagem e a uniformidade de germinação.

A composição química da semente também influencia sua velocidade de embebição. Sementes ricas em proteínas tendem a absorver mais água e de maneira mais rápida, pois são consideradas hidrofílicas. De maneira geral, a ordem crescente de absorção em função dos compostos orgânicos presentes na semente é a seguinte: proteínas, açúcares e lipídios.

Essa variação na composição química das sementes desempenha um papel crítico na regulação da velocidade de

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

embebição e, conseqüentemente, no sucesso da germinação. Portanto, ao considerar a complexidade desse processo, é fundamental levar em conta a composição química das sementes como mais um dos fatores determinantes da velocidade de embebição, juntamente com os demais mencionados anteriormente.

O entendimento detalhado desses fatores é essencial para a compreensão completa dos processos de germinação e da biologia das plantas.

3.4.2 Temperatura

A temperatura desempenha um papel crucial na germinação, afetando a velocidade, a taxa de sementes germinadas e a sua uniformidade. A temperatura influencia a na difusão da água (embebição) e a atividade enzimática em reações bioquímicas. É possível destacar três faixas de temperaturas cardinais:

- a) **temperatura mínima:** abaixo da qual a germinação não é visível em um período razoável, mas não causa a morte da semente (geralmente abaixo de 10° e 15° C);
- b) **temperatura máxima:** acima da qual não ocorre germinação, embora não resulte na morte da semente (normalmente acima de 35°C e 40°C);
- c) **temperatura ótima:** aquela na qual o maior número de sementes germina no menor tempo possível (varia entre 20° e 30°C). Observa-se uma maior velocidade de germinação a uma temperatura ligeiramente superior àquela que promove a máxima germinação. Temperaturas letais são aquelas que causam a morte da semente e geralmente são altas.

3.4.3 Oxigênio

A germinação é um processo aeróbico, e o oxigênio é essencial para as reações oxidativas do processo respiratório. A presença de oxigênio é indispensável para que a germinação ocorra de maneira eficaz. O encharcamento do solo, que leva à condição anaeróbica, pode interromper a germinação devido à falta de oxigênio.

3.4.4 Luz

A maioria das espécies é fotoblástica facultativa, o que significa que suas sementes podem germinar tanto na presença quanto na ausência de luz. A exigência de luz para algumas espécies, conhecidas como fotoblásticas positivas, está relacionada à dormência induzida por pigmentos como o fitocromo. O fitocromo é ativo na forma P730 (infravermelho –

IV) e inativo na forma P660 (vermelho – V). É importante destacar que as sementes precisam estar embebidas em água para responderem ao estímulo fotosensível, como no caso da alfafa.

4. Metabolismo durante o processo germinativo

Para sementes que se encontram vivas, viáveis e não dormentes, o processo germinativo tem início assim que são expostas a condições ambientais propícias, que incluem a disponibilidade de água, oxigênio, temperatura adequada e luz, no caso de sementes fotoblásticas positivas.

A etapa inicial desse processo é a embebição da semente, que promove a hidratação dos tecidos de reserva. Isso desencadeia uma série de eventos metabólicos, incluindo a ativação, síntese e ação enzimática, além do aumento da atividade respiratória, ou seja, da atividade metabólica da semente. Além disso, nesse estágio ocorre a produção de hormônios, como o ácido giberélico, que desempenham um papel crucial. O embrião, após ser hidratado, sintetiza e libera giberelina, que atua na camada de aleurona ou no escutelo, estimulando a produção de enzimas hidrolíticas específicas, como a α -amilase, que atuam nas reservas da semente (endosperma), fornecendo os substratos essenciais para os processos de respiração, crescimento e desenvolvimento do eixo embrionário (Figura 5).

Outros hormônios vegetais, como auxinas e citocininas, também desempenham papéis significativos durante a germinação. Essas substâncias são produzidas tanto durante o processo respiratório quanto nas regiões apicais do eixo embrionário, e são fundamentais para os processos de divisão, alongamento e diferenciação celular.

O fornecimento de oxigênio é crucial para a oxidação das reservas contidas nas sementes, alimentando os processos metabólicos que sustentam a germinação. Essa oxidação ocorre através da respiração aeróbica, que envolve estágios essenciais, incluindo a glicólise, o Ciclo de Krebs e a Cadeia Transportadora de Elétrons. Durante essas etapas, os substratos de reserva, como carboidratos, proteínas e lipídios, são meticulosamente desdobrados em compostos mais simples, como glicose, aminoácidos e ácidos graxos, por meio da atuação de enzimas específicas, como β -amilase, lipases, proteases e sacarase. Esses compostos simplificados são subsequentemente submetidos à oxidação pelo processo respiratório, resultando na produção de ATP, liberação de calor e formação de produtos intermediários essenciais para manter e impulsionar o processo germinativo (Figura 8).

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

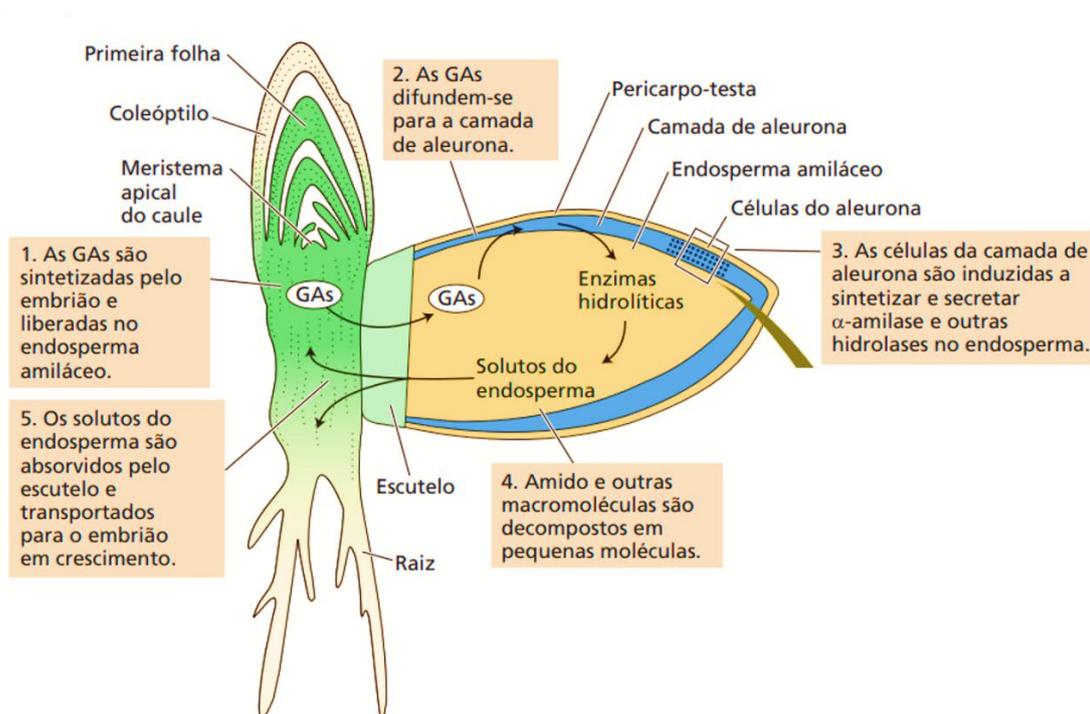


Figura 5. Germinação de um grão de cevada. 1. síntese de giberelinas pelo embrião; 2. ação das giberelinas na camada de aleurona (endosperma); 3. síntese e secreção de α -amilase e outras hidrolases pela camada de aleurona; 4. ação enzimática sobre o amido e outras macromoléculas do endosperma, produzindo solutos mais simples; 5. solutos transportados para o eixo embrionário (embrião) para a respiração e crescimento. **Fonte:** Taiz *et al.* (2017).

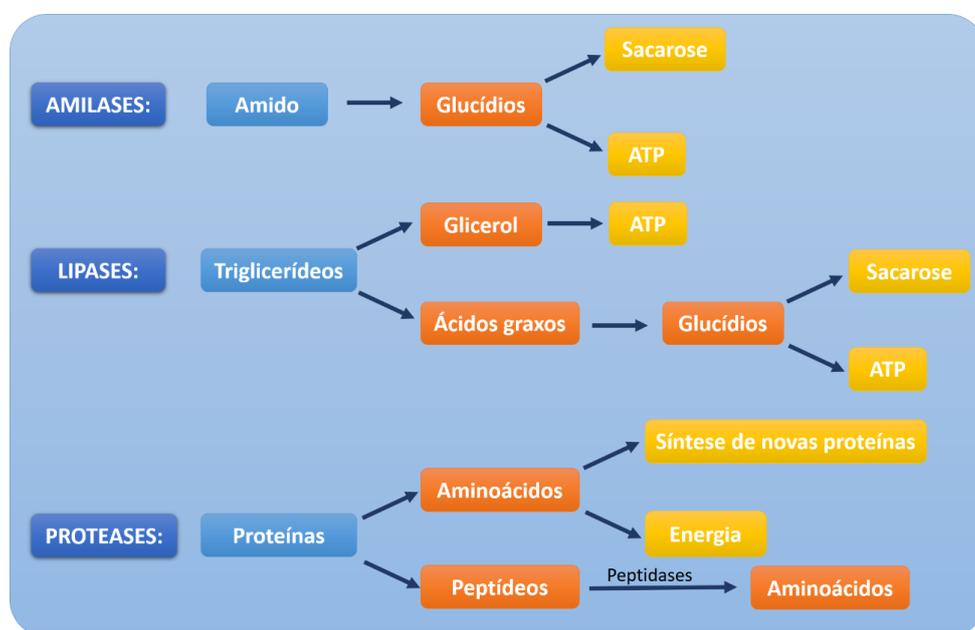


Figura 8. Desdobramento das reservas da semente por meio de enzimas hidrolíticas e específicas (amilases, lipases e proteases), produzindo solutos mais simples e reativos que serão utilizados no processo respiratório do eixo embrionário.

Os solutos solúveis e as substâncias resultantes do processo respiratório são transportados para as regiões apicais do eixo embrionário (plântula) por meio de diferentes mecanismos, como difusão, transporte célula a célula e transporte ativo. Isso é fundamental para garantir o crescimento, incluindo o

alongamento e a multiplicação celular por divisões mitóticas. Nesse processo de crescimento e desenvolvimento do eixo embrionário, o suprimento de água desempenha um papel indispensável (Figura 9).

ARTIGO DE REVISÃO TÉCNICA

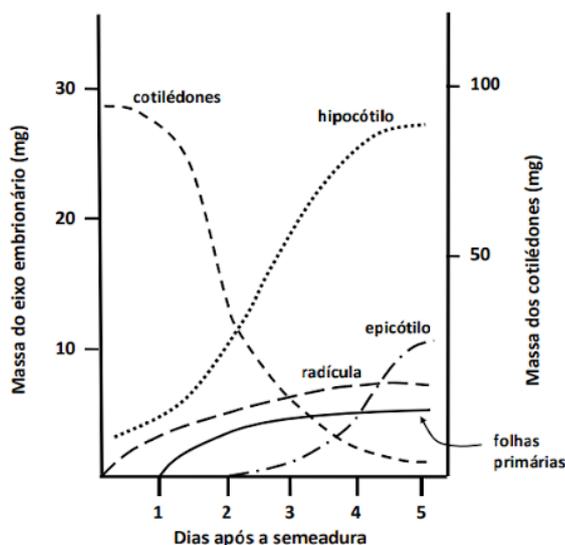


Figura 9. Aumento da massa da matéria seca do eixo embrionário (radícula, epicótilo, hipocótilo e folhas primárias) em função da transferência das reservas dos cotilédones durante a germinação de sementes de *Vigna* sp. **Fonte:** Mayer e Poljakoff-Mayber (1975).

5. Considerações

Em resumo, este artigo proporciona uma análise abrangente e aprofundada dos complexos mecanismos e fatores envolvidos na formação e germinação de sementes, destacando sua absoluta relevância na vida das plantas. A compreensão desses processos desempenha um papel central na capacitação de práticas agrícolas mais eficazes e sustentáveis, tendo em vista o aumento da produtividade agrícola e a preservação da riqueza biológica em nosso planeta.

Aprofundar o conhecimento sobre os intrincados sistemas metabólicos, as atividades enzimáticas e a influência dos fitohormônios nesse contexto é fundamental para aprimorar a agricultura ecológica e a conservação do meio ambiente. À medida que avançamos na pesquisa botânica, abrimos portas para novas descobertas e inovações que podem revolucionar nossa abordagem em relação à produção de alimentos e à proteção da biodiversidade.

Portanto, o entendimento dos processos de formação e germinação de sementes é uma peça crucial no quebra-cabeça do conhecimento científico, contribuindo não apenas para a

ciência botânica, mas também para a sustentabilidade de nosso planeta. À medida que enfrentamos desafios globais relacionados à segurança alimentar e à conservação dos ecossistemas, a pesquisa contínua nessa área é essencial para direcionar ações concretas que beneficiem a humanidade e o ambiente que compartilhamos com as plantas e toda a vida na Terra.

6. Referências

- BEWLEY, J. D. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, v. 9, p. 1055-1066, 1997. Disponível em: https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/750204/mod_resource/content/0/Bewley-Seed_Dormancy-The_plant_cell-1997.pdf. Acesso em: 19 set. 2023.
- BEWLEY J D.; BLACK, A. M. **Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination**. 2 vol. New York: Springer-Verlag, 1978. 375 p. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-68643-6>. Acesso em: 19 set. 2023.
- CARVALHO, P. C. Germinação. *InfoEscola*, [sem data]. Disponível em: <https://www.infoescola.com/plantas/germinacao>. Acesso em: 19 set. 2023.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588 p.
- JULIO, M. F. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: Fealq, 2005. 495p.
- MAYER, A M.; POLJAKOFF-MAYBER, A. **The germination of seeds**. 2. ed. Oxford, Pergamon Press, 1975. 192p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.