

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Análise da hidratação de sementes de Jequitibá-branco
(*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) via modelo
difusivo associado a imagens de microtomografia
computadorizada

Anselmo Nogueira de Camargos Filho

SÃO CARLOS
2022

Análise da hidratação de sementes de Jequitibá-branco (*Cariniana
estrellensis* (Raddi) Kuntze) via modelo difusivo associado a imagens de
microtomografia computadorizada

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

SÃO CARLOS - SP

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 13 de setembro de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Gustavo Dias Maia, DEQ/ UFSCar

Convidado: Marcos Paulo Felizardo, IFMG/ Congonhas

Professor da Disciplina: Fábio Bentes Freire, DEQ/ UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho ao meu pai, que foi minha maior fonte de apoio nos principais momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu pai que sempre me apoiou e esteve ao meu lado em todas minhas conquistas como também nos momentos mais difíceis, sendo meu exemplo de vida.

À minha família que me encorajou a sair de Minas para longe de casa e tornar esse sonho uma realidade, em especial aos meus irmãos Thiago e André, à minha irmã Adelaide, à minha tia Ivânia, ao meu tio Bené e à minha prima Juliana, sem o apoio de vocês nada disso seria possível.

Aos meus amigos que estiveram comigo desde o início dessa trajetória e que deixaram tudo mais fácil.

Ao meu professor/ orientador/ amigo Gustavo Maia por todo o conhecimento repassado para mim e por toda a paciência para realizar o trabalho em meio à pandemia.

À minha parceira Isadora pela paciência e por me aguentar a falar sobre minha paixão por esse trabalho desde o primeiro dia que a conheci.

Ao Fábio Freire e ao Marcos Felizardo por aceitarem fazer parte da etapa final desse trabalho e me avaliar na minha defesa.

RESUMO

Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) é uma espécie nativa ameaçada e de significativa importância ecológica e comercial. Visando a melhoria das condições germinativas com consequente impacto sobre a quantidade e qualidade das mudas produzidas, o presente estudo visou contribuir na análise do processo de hidratação dessas sementes através da interpretação dos ajustes do modelo difusivo considerando a difusividade efetiva constante e variável associado à investigação por imagens de microtomografia computadorizada de raios X (micro-TC). As curvas de hidratação foram realizadas em temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C. O modelo difusivo foi ajustado satisfatoriamente tanto para a difusividade efetiva constante quanto para variável. Os valores de difusividade efetiva foram considerados baixos uma vez que esse tipo de semente apresenta tecidos de proteção contra impactos mecânicos. A análise das variações da difusividade permitiu a observação das três fases de hidratação. As análises de microtomografia permitiram a avaliação da variação da densidade dos tecidos nas umidades 0,25 kg/kg, 0,37 kg/kg, 0,50 kg/kg, 0,62 kg/kg, 0,75 kg/kg. Não ocorreu variações nas dimensões durante o processo de hidratação. A análise das imagens de micro-TC demonstrou que há uma evidente distribuição preferencial de água nos tecidos de reserva que atuam como barreira na proteção do embrião contra impactos hídricos mostrando-se uma técnica promissora a ser empregada nesse tipo de estudo.

Palavras chave: Jequitibá-branco, *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze, cinética de hidratação, microtomografia de raios X, germinação.

ABSTRACT

Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) is an endangered native species of significant ecological and commercial importance. Aiming at improving germination conditions with a consequent impact on the quantity and quality of seedlings produced, the present study aimed to contribute to the analysis of the hydration process of these seeds through the interpretation of the diffusive model adjustments considering the constant and variable effective diffusivity associated with investigation by X-ray computed tomography (micro-CT) images. The hydration curves were performed at temperatures of 25°C, 35°C and 45°C. The diffusive model was satisfactorily fitted for both constant and variable effective diffusivity. The effective diffusivity values were considered low since this type of seed presents protective tissues against mechanical impacts. The analysis of diffusivity variations allowed the observation of the three hydration phases. The microtomography analyzes allowed the evaluation of the tissue density variation in the humidities 0.25 kg/kg, 0.37 kg/kg, 0.50 kg/kg, 0.62 kg/kg, 0.75 kg/kg. There were no variations in dimensions during the hydration process. The analysis of the micro-CT images showed that there is an evident preferential distribution of water in the reserve tissues that act as a barrier to protect the embryo against water impacts, proving to be a promising technique to be used in this type of study.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Jequitibá-branco	3
2.2. Comercialização de sementes.....	4
2.3. Priming de sementes.....	7
2.3.1. <i>Hydropriming</i>	11
2.4. Cinética de hidratação.....	14
2.5. Hidratação de sementes.....	18
2.6. Microtomografia de raios-X	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. Caracterização física	27
3.2. Cinética de hidratação.....	28
3.3. Análise estatística.....	29
3.4. Microtomografia de raios-X	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1. Caracterização física	32
4.2. Cinética de hidratação.....	33
4.3. Ajuste do modelo teórico com difusividade constante	35
4.4. Ajuste do modelo teórico com difusividade variável	38
4.5. Análise de imagens por microtomografia	42
4.6. Energia de ativação	53
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	55
ANEXO 1 – Determinação da espessura das 105 sementes	65
ANEXO 2 – Determinação das umidades iniciais das sementes	66
ANEXO 3 – Determinação das cinéticas de umidificação	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Secção transversal da semente do género <i>Cariniana</i> (cot = colidédone; eh = eixo hipocótilo-radicular; fv = feixe vascular).....	5
Figura 2 – Evolução da produção de sementes no Brasil.	7
Figura 3 – Processo de germinação padrão comparado ao processo de condicionamento osmótico.	8
Figura 4 – Esquema dos ajustes sequenciais.	29
Figura 5 – Sementes utilizadas para a análise da espessura.....	32
Figura 6 – Sementes antes (esquerda) e após umidificação (direita) utilizadas para a análise de imagens.	33
Figura 7 – Taxa de hidratação em função da umidade adimensional nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.	34
Figura 8 – Ajustes matemáticos do modelo de difusão com difusividade efetiva constante para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.	37
Figura 9 – Ajustes matemáticos do modelo de difusão com difusividade efetiva variável para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.	38
Figura 10 – Variação da difusividade no processo de hidratação nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.	39
Figura 11 – Distribuição de resíduos em função do número de Fourier para os ajustes do modelo com D_{ef} constante e variável nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.	42
Figura 12 – Imagem de micro-TC em corte transversal no plano central para uma semente de <i>Jequitibá-branco</i> representada em escala de cinza. A: feixe vascular; B:eixo hipocótilo-radicular; C: endosperma primário.	43
Figura 13 – Distribuição da escala de cinza em diferentes umidades; imagens de micro-TC transversais e longitudinais do plano central em diferentes umidades.	44
Figura 14 – Ajuste para determinação da energia de ativação pela representação de Arrhenius.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características médias das sementes em unidade de lote e em umidificação plena.....	33
Tabela 2 – Coeficientes de difusividade efetiva e análise estatística.....	37
Tabela 3 – Parâmetros da análise estatística para o ajuste do modelo com difusividade variável para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.	39

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A comercialização de sementes e a produção de mudas de espécies de valor comercial constituem atividades promissoras do ponto de vista econômico e ambiental. Uma espécie com significativo interesse comercial é o Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze), em função do alto valor da madeira e da sua utilização como espécie para reflorestamento (CARVALHO, 2003; BARBOSA, 1984; CHUDNOFF, 1984; LÓPEZ, 1987).

A germinação de sementes e o estabelecimento de plântulas são fases críticas no ciclo de crescimento das plantas, uma vez que influenciam e determinam a sobrevivência das espécies em habitats naturais (HADAS, 2005). Assim, a análise da absorção de água em tecidos vegetais tem sido objeto de estudo para diversos pesquisadores.

Na literatura pode-se encontrar pesquisas envolvendo a hidratação de grãos de alpiste (LISBÔA *et al.*, 2015), feijão (RESENDE *et al.*, 2007), pimentas verdes e vermelhas (KAYMAK-ERTEKIN, 2002), cranberries (LENHARD *et al.*, 2016), milho (VERMA E PRASAD, 1999) e batatas (CUNNINGHAM *et al.*, 2007). Em sementes, o processo de hidratação pode interferir de maneira importante nas etapas de germinação e seu estudo permite a avaliação de possíveis impactos causados pelo transporte de água nos diferentes tecidos da semente.

Processos de hidratação são particularmente importantes no estudo do condicionamento osmótico de sementes. Segundo Nascimento (2004), diferentes tipos de tratamentos têm sido desenvolvidos para melhorar a qualidade das sementes e assim aumentar a velocidade de germinação, melhorar a uniformidade das plântulas e até aumentar a quantidade de sementes germinadas. O condicionamento osmótico é um desses tratamentos, sendo considerado uma das técnicas mais promissoras. Esse processo consiste na hidratação controlada por embebição em solução osmótica a fim de garantir benefícios às sementes. Na literatura, encontram-se estudos utilizando sementes de beterraba (COSTA & VILLELA, 2006), de repolho (ARMONDES, 2013), milho doce (OLIVEIRA *et al.*, 2007) que ratificam os benefícios trazidos pelo condicionamento osmótico.

Nascimento (2004) cita os fatores que influenciam o condicionamento osmótico, sendo os principais: o tipo de solução osmótica, o potencial osmótico, a

temperatura, o período de embebição, a aeração, a luz e a secagem das sementes. A solução osmótica mais utilizada no condicionamento é o polietileno glicol (PEG), porém a técnica conhecida como *hydropriming*, permite o condicionamento osmótico unicamente utilizando água destilada.

Estabelecer uma relação entre o grau de hidratação de uma semente e o início de suas atividades metabólicas pode ser uma contribuição expressiva na melhoria dos processos germinativos e contribuir para uma melhora na produção de mudas.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal contribuir na análise do processo de hidratação de sementes de Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) através da interpretação dos ajustes do modelo difusivo considerando a difusividade efetiva constante e variável associado à investigação por imagens de microtomografia computadorizada de raios X (micro-TC).

Como objetivos específicos podemos citar:

- Caracterização física das sementes de Jequitibá-branco, avaliando diâmetro de Ferret médio, esfericidade, perímetro, área, volume e espessura.
- Determinação das cinéticas de hidratação nas temperaturas de 25, 35 e 45 °C.
- Avaliação e ajuste do modelo difusivo utilizando a solução proposta por Crank (1975) aplicada à difusividade efetiva constante e também variável.
- Análise estatística e ajustes do modelo difusivo utilizando difusividade efetiva constante e também variável.
- Determinação das imagens por microtomografia computadorizada e análise da evolução da densidade das sementes durante o processo de hidratação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Jequitibá-branco

O Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) é também conhecido como binga-de-macaco, caixão, coatinga, jequitibá-mestiço, bingueiro, cachimbeiro, estopa, estopeiro, pau-estopa, pau-de-cachimbo, jaquitibá-rosa, jequetibá, jequitibá-amarelo, pilão-de-bugio, pito-de-bugio, jequitibá-cipó, jequitibá-rei, jequitibá-rosa, jequitibá-vermelho, mussambê, pau-caixão, pau-carga, pito-de-macaco (CARVALHO, *et al.*, 2003). Segundo o sistema de classificação de angiospermas de Cronquist, sua posição taxonômica obedece à seguinte hierarquia:

- i. divisão: *Magnoliophyta*
- ii. classe: *Magnoliopsida*
- iii. ordem: *Lecythidales*
- iv. família: *Lecythidaceae*
- v. gênero: *Cariniana*
- vi. espécie: *Cariniana estrellensis*

Conforme citado por Carvalho *et al.* (2000), o Jequitibá-branco é uma árvore semicaducifólia no inverno, com 15 a 35 metros de altura e 50 a 80 centímetros de diâmetro à altura do peito (DAP), podendo atingir até 50 metros de altura e 215 centímetros de DAP na idade adulta. As folhas são simples, lisas, elípticas a lanceoladas, com ápice acuminado, margens serradas e pecíolo levemente alado, possuindo comprimento de 4 a 12 centímetros e 3 a 6 centímetros de largura. Suas árvores compõem uma floresta de clímax, pois necessitam de contato constante com a luz.

De acordo com Carvalho (2003), a madeira do Jequitibá-branco é largamente utilizada em estruturas de móveis, molduras e guarnições internas, peças torneadas, cabos de ferramentas, saltos para calçados, fósforos e na construção civil, nas vigas, esquadrias, torres, caibros, ripas, tabuado e fôrmas de concreto. Devido ao alto valor econômico, a árvore está na lista de espécies ameaçadas à extinção no estado de São Paulo, onde é símbolo estadual.

O fruto do Jequitibá-branco apresenta cápsula cilíndrica de 5 a 9 centímetros de comprimento. Cada fruto contém de 20 a 35 sementes (CARVALHO *et al.*, 2000). Conforme citado por Lorenzi (1998), as sementes de Jequitibá-branco possuem cor castanha, aladas, com até 4 centímetros de comprimento. Um quilograma de sementes contém cerca de 12.000 unidades. O poder germinativo das sementes de Jequitibá-branco varia de 46 a 95%, em média 70% (CARVALHO *et al.*, 2003). Para se obter uma semente de qualidade e otimizar sua germinação, a análise física e fisiológica é necessária para reduzir os problemas relacionados à avaliação da qualidade de sementes (LIMA JUNIOR, 2010).

Figliolia *et al.* (2000) realizaram estudos sobre o material e condições de armazenamento. As sementes armazenadas em câmara fria mantiveram qualidade fisiológica por 240 dias, enquanto as armazenadas em ambiente normal a mantiveram por apenas 60 dias. Jesus *et al.* (1984), armazenando as sementes em câmara fria (10°C e 65 % de umidade relativa), permitiram a conservação da viabilidade das sementes pelo período de sete meses independentemente do tipo de embalagens utilizadas. De acordo com Carvalho (2003), as sementes do Jequitibá-branco apresentam baixa viabilidade natural em ambiente não controlado.

Rêgo e Possamai (2001) realizaram estudos sobre as características morfológicas das sementes do gênero *Cariniana*, mais especificamente acerca do Jequitibá-rosa. Os autores alegaram que existe a necessidade de se mostrar, cientificamente, o potencial de muitas espécies florestais para que venham a ser exploradas de forma racional e ordenada.

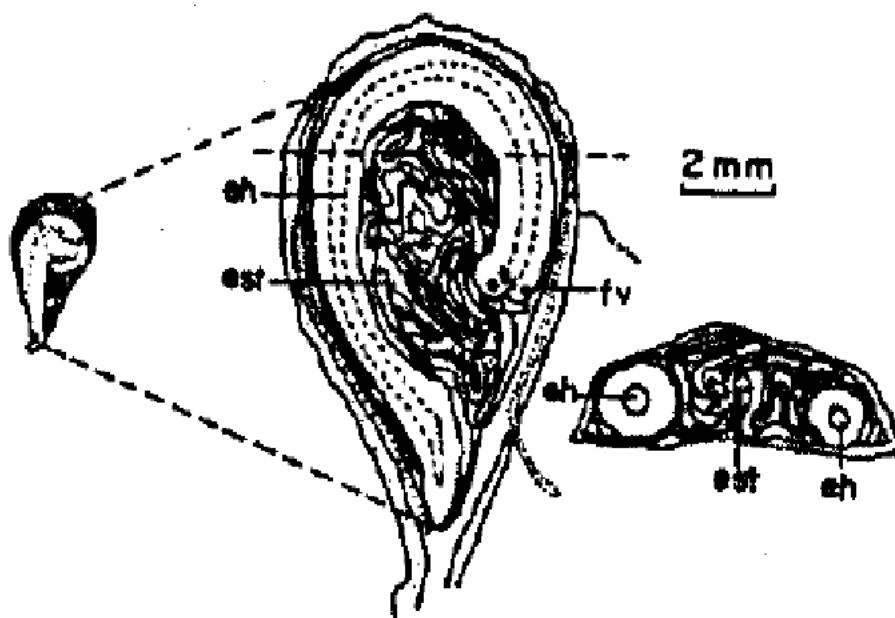
O estudo ecofisiológico é importante para embasar programas de plantio, visando tanto a finalidade econômica ou de conservação de áreas desflorestadas. Segundo Rêgo e Possamai (2001), hoje tem-se poucas informações sobre os comportamentos morfológicos das sementes.

2.2. Comercialização de sementes

Na visão comercial, com a escassez dos recursos florestais, a madeira se torna um material mais caro (CIRIELLO, 2011). Com os reflorestamentos sustentáveis, fortalecidos por políticas ecológicas, ambientais e sociais, o mercado de madeira legalizada cresce e, portanto, se torna garantido de acordo com a

demanda. Essa visão pode ser estendida para locais ou situações em que fatores socioeconômicos impedem as atividades de restauração. Desta forma, a escolha das espécies plantadas em um reflorestamento pode ser feita com uma abordagem comercial (LAMB *et al.*, 1997). A Figura 1 retrata o corte longitudinal e secção transversal da semente de Jequitibá-rosa:

Figura 1 – Secção transversal da semente do gênero *Cariniana* (cot = colidédone; eh = eixo hipocótilo-radicular; fv = feixe vascular).



Fonte: Rêgo e Possamai (2001)

Produzir sementes com baixas taxas de germinação implica em perda de recursos econômicos. Portanto, as várias etapas da produção de sementes devem ser planejadas para obter sementes de qualidade satisfatória e quantidade suficiente (NOGUEIRA E MEDEIROS, 2007).

Segundo dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura, a demanda por espécies florestais está acima dos plantios florestais. A informação é de que o déficit desse tipo de madeiras está cerca de 300 mil hectares ao ano.

De acordo com FAO (2015), o Brasil possui a segunda maior área de florestas nativas no mundo e ocupa a nona posição no ranking de maior área de plantios

florestais. Segundo Cabbage *et al.* (2010), os países tropicais e subtropicais do Sudeste Asiático e da América do Sul, dentre eles o Brasil, tem as maiores produtividades de plantios florestais. O autor ainda afirma que esses países possuem os maiores investimentos no setor da silvicultura, apresentando uma taxa de retorno interna maior do que 12%. Contudo, más políticas de regulação florestal e falta de conhecimento sobre os produtos gerados fazem esse crescimento ser freado (CUBBAGE *et al.*, 2010). Desta forma, a transformação do setor da silvicultura visando a sustentabilidade é imprescindível. Essas transformações para o manejo sustentável dos plantios florestais fortalecem o setor e incrementam os incentivos por investimentos tecnológicos (COLODETTE *et al.*, 2014).

Segundo IBÁ (2018), os subsídios na silvicultura e em indústria baseada na madeira de plantios florestais atingiram cerca de R\$ 6,5 bilhões em 2018, dos quais R\$ 3,2 bilhões em manejo florestal e o restante na indústria.

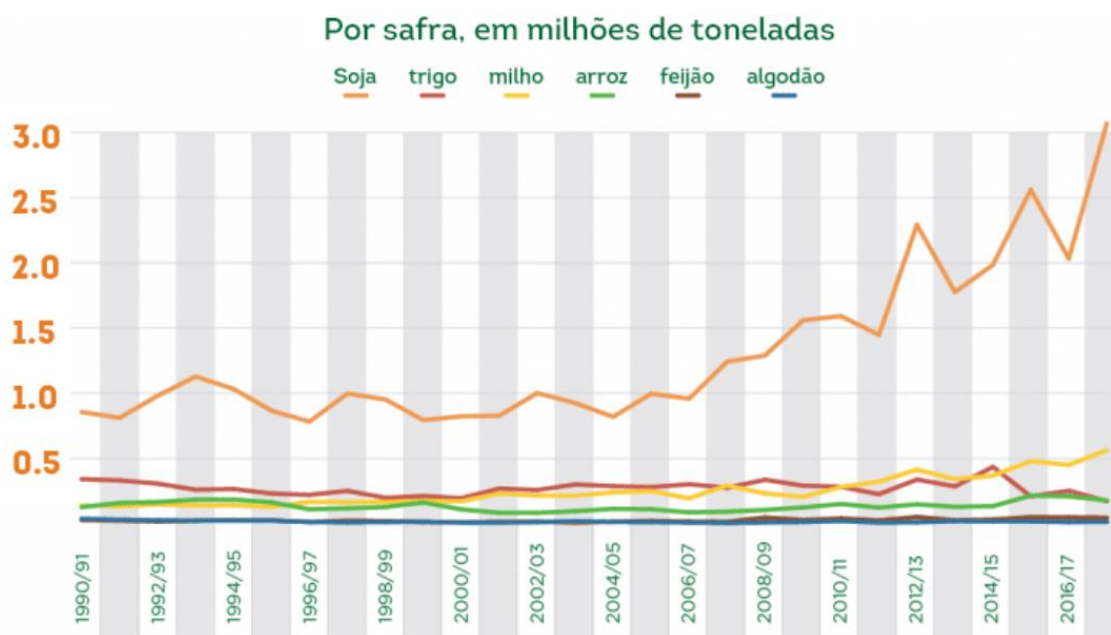
Mesmo com os incentivos fiscais pela Legislação (Lei nº 5.106/1966), com isenção de impostos para investimentos em reflorestamentos, o mercado de sementes nativas é muito informal e poucas são as espécies com testes laboratoriais protocolados nas Regras para Análise de Sementes (RAS) (RIBEIRO-OLIVEIRA, 2014). No entanto, a Lei nº 10.711, ao regulamentar a comercialização de sementes e mudas, preveu subsídios legais para promover a formalização do setor de sementes florestais. Com isso, tem sido crescente a demanda de sementes adequadas para suprir as necessidades das empresas com vistas aos programas de plantio.

As últimas estatísticas da associação Brasileira de Sementes e Mudanças (Abrasem) mostram que o setor nacional de sementes movimenta cerca de R\$ 10 bilhões por ano. Em dez anos, a produção brasileira aumentou 122%, passando de 1,8 milhão de toneladas em 2005/2006 para 4 milhões de toneladas em 2015/2016. Com isso, o Brasil ocupa a terceira posição no mercado de sementes, depois dos EUA e da China. Em dimensões de cultivos, encontram-se as seguintes divisões: 60 milhões de hectares de cereais (como milho, soja, trigo, arroz, algodão e leguminosas), 130 milhões de hectares de forrageiras e mais de 1 milhão de hectares de flores, frutas e hortaliças. A Figura 2 apresenta a evolução da produção de sementes no Brasil.

Os mercados de sementes de soja e milho continuam sendo os principais no

Brasil, representando juntos 74% do mercado de sementes. No entanto, outros vertentes importantes de sementes, como frutas e legumes, têm visto crescimento e especialização nos últimos anos.

Figura 2 – Evolução da produção de sementes no Brasil.



Fonte: Associação Brasileira de Sementes e Mudanças (2019)

2.3. *Priming* de sementes

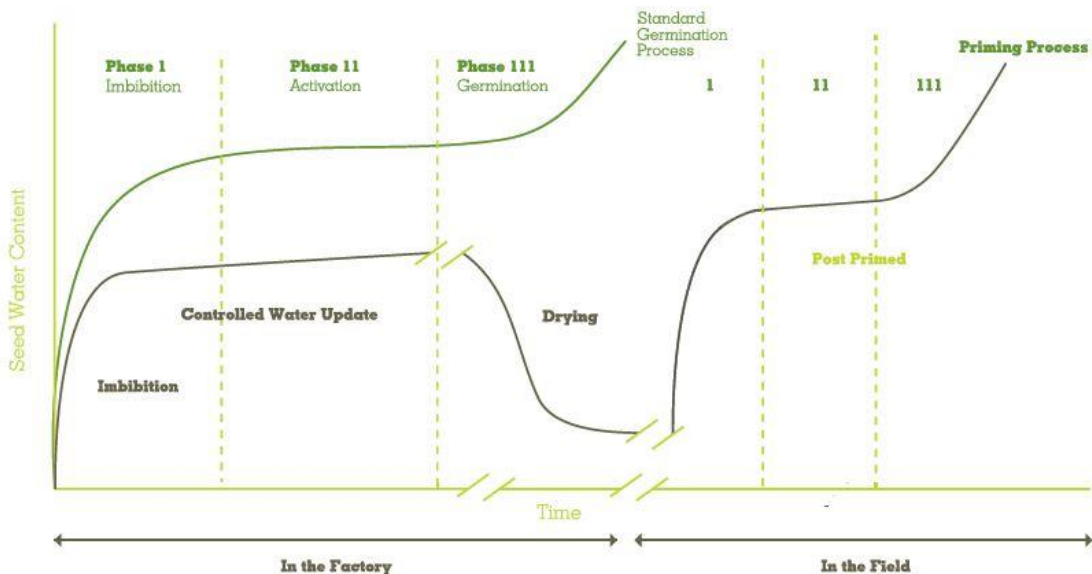
De forma a aumentar a qualidade genética, física e fisiológica das sementes, diversos pesquisadores buscam inovações para garantir a qualidade e produtividade das espécies. Quando a semente chega ao campo, ela deve ter vigor para passar por intempéries e outras condições edafoclimáticas, sobre as quais o produtor não tem controle (NASCIMENTO, 2004). Além disso, é preciso ter sementes de qualidade para enfrentar a demanda atual por altos padrões no mercado agrícola (PAPARELLA *et al.* 2015).

O condicionamento osmótico é uma técnica comum para se obter o máximo de emergência de plântulas. Nesse processo, a temperatura e o teor de umidade da

semente é controlada de tal forma a levá-la aos primeiros processos bioquímicos nos estágios iniciais de germinação, promovendo assim as atividades chamadas de pré-metabólicas (NASCIMENTO, 2004). Nesse processo, ocorre a ativação das vias de reparo do DNA e mecanismos antioxidantes, essencial para preservar a integridade do genoma, garantindo boa germinação e desenvolvimento das plântulas (PAPARELLA *et al.* 2015). Dessa forma, mesmo sem ocorrer a emissão da raiz primária, o condicionamento osmótico envolve o avanço da semente para um estágio igual do processo inicial de germinação, permitindo assim uma emergência rápida e uniforme quando plantada.

A Figura 3 apresenta os estágios da sementes comparando o processo padrão e o processo controlado por condicionamento osmótico:

Figura 3 – Processo de germinação padrão comparado ao processo de condicionamento osmótico.



Fonte: Germain's Seed Technology

Pode-se notar na Figura 1 que durante a primeira fase, conhecida como embebição, a semente absorve água. Isso só é possível caso as sementes não estejam sob condições extremas, ou seja, dentro de temperatura e de umidade

adequadas. Durante a fase 2, denominada de ativação, a semente começa a iniciar a germinação. Nesse estágio, ocorre a ativação dos processos pré-metabólicos. A terceira fase é a germinação, na qual a semente emerge.

Na literatura (GERMAIS SEED, 2016; PAPARELLA *et al.* 2015,) encontram-se diversos benefícios do condicionamento osmótico na germinação de sementes:

- Maior velocidade de emergência;
- Reduz a foto e termodormência;
- Maior tolerância ao estresse biótico e abiótico, permitindo que a semente germine e emerja mesmo em condições agroclimáticas adversas;
- Melhora a uniformidade para otimizar a eficiência da colheita;
- Aumenta o vigor para o desenvolvimento rápido e forte das plantas;
- Aumenta o potencial de rendimento.

Na literatura, encontram-se diversos estudos sobre a germinação de diferentes espécimes reagindo à técnica de condicionamento osmótico. Yaldagard *et al.* (2008) concluíram que o *priming* acelerou a germinação de sementes de cereais da indústria cervejeira. Dearman *et al.* (1987) realizaram o tratamento de diversas espécies de sementes de hortaliças utilizando o condicionamento osmótico, tais como cenoura, alho-poró e cebola. Di Girolamo e Barbanti (2012), realizaram estudos com o *priming* em sementes de flores, mais especificamente petúnias. Os autores conseguiram melhorar a qualidade do produto final. Entretanto, segundo Murungu *et al.* (2004), o condicionamento osmótico pode ter suas vantagens reduzidas quando preparado em larga escala, embora as vantagens sejam bem conhecidas. Paparella *et al.* (2015) ainda citam que os conhecimentos de condicionamento osmótico são proprietários e administrados por empresas especializadas em agro-sementes.

O tipo de condicionamento osmótico empregado depende da espécie da planta, morfologia e fisiologia da semente. Dessa forma, pode-se aplicar diferentes tratamentos, todos eles desencadeando o chamado “metabolismo pré-germinativo” (PAPARELLA *et al.* 2015).

Vários pesquisadores (PAPARELLA *et al.*, 2015; MCDONALD, 2000; KHAN, 1991; NIRANJAN *et al.* 2004; PARERA E CANTLIFFE, 1990) apontam como

principais as seguintes técnicas de condicionamento de sementes:

- *Hydropriming*: nesse tipo de condicionamento, as sementes são embebidas em água sob condições adequadas de temperatura, variando entre 0 e 20 °C. O processo de hidrocondicionamento é muito utilizado em áreas agrícolas prejudicadas por condições climáticas adversas, como por exemplo em locais secos. Nesses casos, é necessário melhorar a eficiência da captação de água, minimizando a exposição a agroquímicos.
- *Osmopriming*: o *priming* osmótico é uma técnica que envolve soluções osmóticas com baixo potencial hídrico, o que facilita o controle da absorção de água. Quando a semente entra em contato com a água, os danos às membranas de proteção (lipídicas e protéicas) e o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ERO) fazem com que ocorra a transferência de massa. O objetivo da osmopriming é retardar essa transferência, fazendo com que a semente não entre no processo germinativo. A principal solução utilizada no osmopriming é o polietileno glicol, pois sua natureza inerte evita efeitos citotóxicos e o seu grande tamanho molecular impede a absorção da molécula na semente.
- *Solid matrix priming*: esse tipo de condicionamento foi desenvolvido para superar os altos custos com o *osmopriming*, já que este necessita de grandes volumes de solução e um controle de temperatura e aeração sofisticado. Diferentemente do *osmopriming*, nessa técnica se utiliza uma matriz sólida para adequar o teor de umidade da semente. Essa técnica se assemelha ao processo de embebição que ocorre no solo. Esse tipo de condicionamento é feito preferencialmente em recipiente fechado, no qual permita a circulação do ar, mas sem ocorrer a evaporação excessiva de água. O material utilizado no processo pode ser orgânico ou inorgânico, sendo o carvão o principal utilizado. Por se tratar de um composto mais barato, esse processamento tem um custo menor que os outros, permitindo assim o tratamento simultâneo de grande quantidade de sementes.
- *Biopriming*: nessa técnica de condicionamento, as sementes entram em contato com microorganismos ou moléculas bioativas, como fungos ou bactérias específicas. Para esse tipo de processamento, utiliza-se, principalmente, as cepas de *Trichoderma spp.*, *Enterobacter spp.*,

Pseudomonas spp. e *Bacillus spp.* Pode-se utilizar fitohormônios para alavancar os resultados do biopriming, pois esses compostos auxiliam no controle dos principais processos bioquímicos durante a maturação/germinação das sementes.

- *Chemopriming*: nesse processo, adiciona-se desinfetantes convencionais para evitar contaminações microbianas. Os materiais mais comumente utilizados são hipoclorito de sódio (NaOCl) ou ácido clorídrico (HCl). Na agricultura orgânica, utiliza-se compostos naturais com ação antimicrobiana, tais como ácidos orgânicos, óleos essenciais, extratos brutos de plantas e produtos lácteos.
- *Thermopriming*: o termocondicionamento se baseia no tratamento das sementes em diferentes temperaturas. Ela é largamente empregada em locais com climas adversos, onde ocorre a inibição térmica das sementes. As baixas temperaturas geralmente fornecem os melhores resultados do condicionamento térmico.

2.3.1. Hydropriming

Como mencionado por Paparella *et al.* (2015) e Nawaz *et al.* (2013), esse tipo de condicionamento envolve a imersão das sementes em água durante um período definido antes do processo germinativo. O tempo necessário de embebedação depende do tempo de protrusão radical de cada espécie (HASANUZZAMAN, 2019). Segundo Nawaz *et al.* (2013), o baixo rendimento de culturas está diretamente atrelado às condições desfavoráveis para a germinação das sementes e posterior emergência das plântulas. Rafiq *et al.* (2006) atrelaram o condicionamento das sementes à redução do efeito da salinidade do solo nas atividades metabólicas das mesmas. Uma das principais vantagens do condicionamento utilizando água é seu custo relativamente baixo e simplicidade. Entretanto, Nawaz *et al.* (2013) fazem alertas sobre o uso dessa técnica. Em algumas espécies de plantas, a hidratação rápida pode causar vazamento de nutrientes essenciais para fora da semente, resultando em danos que afetam o vigor, resultando em uma germinação não uniforme e menor produtividade das mesmas.

Após a submersão em água, as sementes são secadas para voltar ao seu

peso original. Segundo Pill e Necker (2001), o hidrocondicionamento permite que a semente embeba água e passe pela primeira fase de germinação na qual as atividades metabólicas de pré-germinação são iniciadas enquanto as duas últimas fases de germinação são inibidas, fenômeno que pode ser observado na Figura 1. Muitos estudos relataram que o hidrocondicionamento pode melhorar o vigor das plântulas e a produtividade das culturas de campo, os quais serão relatados a seguir.

Farooq *et al.* (2007) realizaram estudos com o hidrocondicionamento utilizando arroz. O principal método de cultura do arroz é o transplante. Nele, as mudas são criadas em viveiro e depois transplantadas para poças e campos bem preparados. Mesmo sendo o processo mais tradicional de semeadura, ele possui um rendimento final baixo devido à alta mortalidade. Os autores realizaram os experimentos de germinação nos campos do Paquistão, entre os anos de 2004 e 2005. O hidrocondicionamento teve duração de 48 horas a temperatura ambiente. Eles concluíram que o condicionamento melhorou o vigor inicial das plântulas e resultou em melhor crescimento, rendimento e qualidade do arroz transplantado.

Dastanpoor *et al.* (2016) utilizaram a técnica de hidrocondicionamento para melhorar a qualidade das sementes de sálvia (*Salvia officinalis L.*), aumentar o vigor e, conseqüentemente, o crescimento de plântulas. Os autores realizaram os experimentos com a sementes de sálvia por hidrocondicionamento em três temperaturas 10, 20, 30 °C com duração de 0, 12, 24 e 48 h. Como efeito do condicionamento, foi evidente o aumento da porcentagem final de germinação das sementes utilizando a técnica nas três temperaturas, exceto no ensaio realizado a 30 °C e 48 h. O uso do hidrocondicionamento promoveu um aumento de 25,5% na taxa de germinação de sementes de sálvia.

Matsushima *et al.* (2013) utilizaram a técnica de hidrocondicionamento em sementes de arroz, com o objetivo de suprir a eventual condição de baixa umidade do solo dos arrozais. Nessa condição, as sementes de arroz necessitam de uma germinação rápida e emergência segura de plântulas de forma a garantir melhor capacidade de absorção de água e atividades metabólicas das sementes. No estudo, as sementes de arroz foram submersas em água a 30 °C por 12 h. Os autores usaram três parâmetros comparativos, classificadas como *priming*, embebedação e controle. As sementes do grupo *priming* foram posteriormente secas

para atingir seu peso inicial. Já as sementes para embebição não foram secas antes da semeadura. As sementes do grupo controle não tiveram nenhum tipo de tratamento. Os ensaios germinativos foram realizados em diferentes condições de umidade do solo, sendo elas 3%, 6%, 8%, 11%, 15% e 20%. Concluiu-se que o tempo de emergência de plântulas diminuiu com o condicionamento das sementes no intervalo de umidade do solo de 3% a 11%. Em particular, na condição de 8% obteve o melhor tempo de emergência, melhorando de 26,8 h para 21,7 h em comparação com o grupo controle.

Damalas *et al.* (2019) utilizou sementes de feijão-fava (*Vicia faba L.*) para observar a mudança de resultados de germinação com a técnica de hidrocondicionamento. Os autores realizaram a técnica por 0, 8, 16, 24, 36 e 48 h para então semear e obter as porcentagens finais de germinação nas diversas condições. Concluiu-se que os tratamentos com hidrocondicionamento melhoraram os parâmetros de germinação das sementes de feijão-fava. Em números, a técnica de hidrocondicionamento aumentou a velocidade de germinação em 16,2% e o índice de vigor das plântulas em 13,4%. Os ensaios de *hydropriming* realizados por 8, 16 e 24 h proporcionaram os maiores valores de velocidade de germinação. Nos testes de campos e emergência de plântulas, a técnica de hidrocondicionamento não afetou significativamente a emergência de plântulas 14 dias após a semeadura no primeiro ano. Em contrapartida, obteve-se uma melhora de 34,4% de emergência no segundo ano. O condicionamento por 8 h resultou na maior produtividade de sementes, sendo de 12,0% no primeiro ano e 5,9% no segundo ano.

Roy and Srivastava (1999) confirmaram que o hidrocondicionamento de sementes de trigo melhorou a germinação em solo salino. Para isso, os autores utilizaram os parâmetros porcentagem de germinação de sementes, comprimento de raiz e parte aérea e razão raiz:parte aérea para verificar o efeito do condicionamento em diferentes cenários de estresse salino. Os resultados indicaram que os parâmetros de controle foram significativamente afetados negativamente quando as concentrações de sal foram aumentadas. Os pesquisadores concluíram que o tratamento utilizando condicionamento aumentou a germinação das sementes, o comprimento da raiz e da parte aérea, a relação raiz:parte aérea sob os níveis de concentração de sal e, contudo, teve um efeito positivo ao estresse salino.

Moradi e Younesi (2009) estudaram a influência de tratamentos utilizando o

osmocondicionamento e hidrocondicionamento em sementes de sorgo. A solução utilizada para o osmocondicionamento foi o polietileno glicol (PEG 6000) e os ensaios em solução foram realizados nos intervalos de tempos de 12, 24 e 36 horas na temperatura de 15 °C, considerada subótima. Os autores concluíram que em ambos tipos de condicionamento, houve o aumento da porcentagem e do tempo médio de emergência das sementes nas condições de ensaios propostas, em especial para os intervalos de condicionamento de 12 e 24 horas. No entanto, o condicionamento por 36 horas não trouxe benefícios significativos aos parâmetros comparativos utilizados.

2.4. Cinética de hidratação

A análise da absorção de água em materiais particulados tem sido objeto de estudo para diversos pesquisadores. Na literatura pode-se encontrar pesquisas envolvendo grãos de alpiste (LISBÔA *et al.*, 2015), feijão (RESENDE *et al.*, 2007), pimentas verdes e vermelhas (KAYMAK-ERTEKIN, 2002), cranberries (LENHARD *et al.*, 2016) e batatas (CUNNINGHAM *et al.*, 2007) demonstrando o seu interesse e a sua importância.

A cinética de hidratação depende de diversas variáveis, como exemplo a temperatura e a umidade inicial do material. O comportamento da hidratação pode ser estudado por meio de dados de variação do teor de água em função do tempo e, posteriormente, comparado com modelos presentes na literatura. O estudo e interpretação dos resultados obtidos pela modelagem empírica e fenomenológica permite prever e simular o comportamento de determinado parâmetro e processo (LISBÔA *et al.*, 2015). Os modelos empíricos são mais simples e de fácil aplicação por não possuírem uma fundamentação teórica. Estes são construídos na análise de dados experimentais, na análise estatística e na análise dimensional. Por outro lado, os modelos fenomenológicos são baseados em teorias e leis de transferência de massa e de calor. Com isso, tendem a ser mais complexos, envolvendo parâmetros que refletem, com boa aproximação, o sentido físico do sistema.

O modelo teórico de difusão líquida é o mais comum entre os modelos fenomenológicos aplicados ao processo de hidratação, podendo também ser aplicado ao processo de secagem. Este modelo considera a difusão líquida,

baseada na Segunda Lei de Fick (Equação 1), como o principal mecanismo de transporte de água.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1)$$

Onde:

X – Umidade em base seca

D – Coeficiente de difusão de líquido, $m^2 s^{-1}$

t – Tempo de umidificação, s

x – Distância para difusão, m

Para partículas com formato esférico, a Equação 1 se se converte na Equação 2:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Onde:

r – Raio da partícula, m

O coeficiente de difusividade efetiva relaciona as taxas de variação temporal e espacial da concentração de água. Este gradiente de concentração existente entre a superfície e o interior do material particulado é a força motriz para ocorrer a difusão. Segundo Brooker *et al.* (1992), ocorrem alterações na composição química e na estrutura física do material em paralelo a difusão de água. Como os grãos podem, em sua maioria, ser capilares porosos, os possíveis mecanismos de transporte de água são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica.

A determinação do coeficiente de difusão efetivo pode ser dada por meio da analogia da Segunda Lei de Fick. A título de simplificação, assume-se as seguintes hipóteses:

- O material é isotrópico e uniforme;

- A superfície do sólido atinge a saturação instantaneamente;
- O teor inicial de umidade no sólido é uniforme;
- O coeficiente de difusão da água é constante;
- O gradiente de umidade no centro do sólido é zero;
- A geometria da amostra permanece constante durante o processo de hidratação;
- A resistência externa à transferência de calor e massa é insignificante;
- A transferência de calor é mais rápida que a transferência de massa, de modo que o processo pode ser considerado isotérmico.

Para a solução analítica, considerou-se as seguintes condições de contorno aplicadas ao modelo:

$$X(r, t)|_{r=R_c} = X_{eq}; (t > 0) \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; (t > 0) \quad (4)$$

$$X(r, t)|_{t=0} = X_0 \quad (5)$$

Com isso, obtém-se a seguinte equação proposta por Crank (1975):

$$X^* = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\left[\frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{9} \left(\frac{3}{r} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

Onde:

X^* – Umidade adimensional

X_t – Umidade em determinado tempo t

X_0 – Umidade inicial

X_{eq} – Umidade quando atingido o equilíbrio

n – Número de termos da somatória

D_{ef} – Coeficiente de difusividade efetiva de líquido, $m^2 s^{-1}$

t – Tempo de hidratação, s

r – Raio equivalente da amostra, m

A solução analítica desta equação se apresenta na forma de uma série infinita de rápida convergência. Desta forma, um número finito de termos (N) pode ser utilizado para uma precisão especificada.

Crank (1975) definiu o adimensional de umidade como sendo o quão distante o material a ser processado está da sua condição de equilíbrio final. Com isso, quando X^* possui valor unitário, significa que o processo está o mais longe do seu estado final. Deste modo, a condição de contorno inicial obrigatória é que, quando $t = 0$, $X^* = 1$. Este estado final pode ser o produto totalmente seco, caso o processo seja o de secagem, ou o produto completamente hidratado, caso seja um processo de hidratação.

Vale ressaltar que o modelo proposto considera que há sempre umidade de equilíbrio na superfície. Isso significa que o modelo considera que independente da difusão de água para o interior da semente ser rápida ou lenta, qualquer conteúdo de água que difunde para o interior da semente é instantaneamente distribuído entre os tecidos internos, de forma que o gradiente de concentrações no interior da semente é considerado desprezível.

A solução do modelo é feita para uma partícula com características físicas médias da amostra como meio representativo de todas as partículas do sistema.

O número adimensional de Fourier pode ser calculado pelo coeficiente de difusividade efetivo (D_{ef}), tempo de hidratação (t) e espessura da semente (L).

$$F_o = \frac{D_{ef} \cdot t}{L^2} \quad (7)$$

A influência do coeficiente efetivo de difusão com a temperatura pode ser expressa por meio da representação de Arrhenius.

$$D_{ef} = D_0 e^{\left[\frac{-E_a}{RT_a}\right]} \quad (8)$$

Onde:

D_0 – Fator pré-exponencial equivalente ao coeficiente de difusão para temperatura tendendo ao infinito, $m^2 s^{-2}$

E_a – Energia de ativação, kJ mol^{-1}

T_a – Temperatura absoluta, K

R – Constante universal dos gases, $\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

2.5. Hidratação de sementes

A literatura apresenta uma série de estudos sobre a hidratação dos mais variados tipos de sementes e de sua importância na geração de conhecimento sobre cada uma delas.

Balbinoti *et al.* (2017) realizaram estudos da hidratação do arroz, visto a necessidade de conhecimento desta etapa em determinados processos alimentícios, como a parboilização. O objetivo do estudo foi utilizar modelos matemáticos empíricos e fenomenológicos (modelo de Page, modelo de Omoto e modelo difusivo de Fick) para estudar a cinética de absorção de umidade do arroz em casca e a medição das propriedades termodinâmicas (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs). A transferência de massa foi diretamente influenciada pela temperatura do sistema. A solução analítica da Segunda Lei de Fick proposta por Crank se adequou melhor aos modelos empíricos utilizados. Embora seja empírico, o modelo de Page se adequou ao processo de hidratação nas três temperaturas. Entretanto, o modelo de Omoto apresentou comportamento diferente para cada condição, sendo a temperatura de 45 °C a de melhor ajuste e as de 55 e 65 °C as piores. Os ensaios de hidratação foram realizados em banho termostático nas temperaturas de 35, 45, 55 e 65 °C por 15 horas. Foi possível observar as três etapas da hidratação nas diferentes temperaturas. No início do processo, a umidade aumentou rapidamente, até ir moderando e, por fim, alcançar o equilíbrio ao longo tempo.

Kaymak-Ertekin (2002) realizou estudos com sementes de pimentões verdes e vermelhos. Previamente, o autor realizou a secagem das fatias em um leito fluidizado à escala de bancada. Experimentos foram realizados para determinar o efeito das variáveis do processo na cinética de secagem. As dimensões das fatias foram mantidas constantes em todos os experimentos. Em velocidades do ar mais baixas (0,5 a 1,8 m/s), observou-se que a taxa de secagem e o coeficiente de difusividade aparente foram afetados pela velocidade do ar. Entretanto, para valores de velocidade do ar superiores a 2 m/s não foi observado efeito significativo na taxa

de secagem, especialmente para pimentões vermelhos. Após o processo de secagem, os experimentos de reidratação foram realizados em água destilada a 25 e 45 °C. Observou-se um aumento significativo na taxa de reidratação dentro do período inicial, mais especificamente nas duas primeiras horas de ensaio. Entretanto, a taxa de reidratação diminuiu à medida que o processo se aproximou do estado de equilíbrio. Kaymak-Ertekin concluiu que tratamentos de pré-secagem melhoraram parcialmente as características de reidratação dos pimentões, porém a temperatura não afetou significativamente os coeficientes de difusão modelados pela Segunda Lei de Fick. Isso significa que, como esperado, a reidratação a 45°C foi mais rápida do que a 25°C. No entanto, a diferença entre os valores de difusividade aparente não foi estatisticamente significativa.

Lenhard *et al.* (2016) estudou a modelagem da cinética de reidratação das cranberries em diferentes temperaturas e meios de imersão. Como a cranberry é uma fruta que apresenta um tempo de vida útil relativamente curto, por conta de sua estrutura frágil, altos teores de água e elevada taxa respiratória, o processo de secagem é de grande importância para conservar o produto por um período mais longo de tempo. Para posterior consumo, é preciso reidratar as frutas. Os autores utilizaram água e leite como meios de imersão por 6 horas e três temperaturas, sendo elas 10, 29 (ambiente) e 45 °C. Utilizou-se três modelos para representar a cinética da reidratação das frutas. O modelo da segunda Lei de Fick modificada representou satisfatoriamente os dados experimentais. Foi constatado que o coeficiente de difusão aumentou com o incremento da temperatura de reidratação.

Maldonado *et al.* (2009), realizaram estudos de reidratação com mangas nas temperaturas de 25, 40 e 60 °C. Além disso, os autores puderam ver como a reidratação foi afetada pelo pré-tratamento da fruta com osmodesidratação em sacarose ou glicose antes de ser desidratada termicamente. A osmodesidratação foi feita a uma temperatura constante de 25 °C e com agitação orbital contínua (105 rpm) em um shaker. A umidificação pode ser interpretada pelo modelo da Segunda Lei de Fick, assumindo a difusão isotrópica. Para determinação do coeficiente de difusão, os autores consideraram somente o primeiro termo da série matemática da solução proposta por Crank (1975), já que os resultados não foram significativamente diferentes daqueles obtidos usando 3, 5 e 7 termos da série. Como esperado, o coeficiente efetivo de difusão da água foi maior a 40 °C do que a

25 ou 60 °C. Aumentar a temperatura de reidratação de 25 para 40 °C não somente aumentou a absorção de água, como também a perda de sólidos. Se tratando de um processo rápido, após 60 minutos, o sistema se aproximou da saturação e o efeito da temperatura na perda de sólidos tornou-se quase insignificante. Entretanto, após aumentar a temperatura de 40 °C para 60 °C, foi evidenciado a diminuição da quantidade de água absorvida, o que pode ser explicado pelos danos causados à fruta. Segundo os autores, um aumento na temperatura de reidratação causa a degradação dos tecidos, o que aumenta os danos causados durante a desidratação térmica e promove uma maior perda de resistência mecânica nas amostras. Os autores concluíram que a cinética de reidratação da manga não foi afetada pelos pré-tratamentos de osmodesidratação em sacarose. No entanto, o pré-tratamento em glicose melhorou significativamente a reidratação.

Khazaei *et al.* (2007) fizeram testes de hidratação de sementes de gergelim em água pura nas temperaturas de 27 e 60 °C. O processo de hidratação é importante no processamento das sementes de gergelim pois tem influência direta no descascamento da matéria. O processo de descascamento geralmente exige que as sementes sejam hidratadas primeiro para facilitar a operação. As sementes sem cascas são então lavadas e secas para produzir o produto final. As sementes descascadas são consumidas em panificação, bolo, pães de hambúrguer, biscoitos e salgadinhos. Além da modelagem pela segunda Lei de Fick, os autores utilizaram uma técnica alternativa (técnica de superposição tempo-temperatura) para modelar o efeito da temperatura na cinética de absorção de água. Os valores do coeficiente de difusão calculados usando duas formas diferentes: Lei de Fick da difusão da água em sólidos de forma arbitrária e Lei de Fick da difusão da água em sólidos de forma esférica. Os coeficientes de difusão de ambas modelagens foram da ordem de 10^{11} m²/s. Geralmente, o processo de hidratação das sementes de gergelim é demorado, durando cerca de 4 horas. Para minimizar o risco de perda de nutrientes durante a imersão em água, é desejável reduzir o tempo de imersão. Os métodos tradicionais de diminuir o tempo de imersão incluem o uso de altas temperaturas de imersão. A absorção de umidade foi um processo endotérmico com um calor de absorção de 7,37 kJ/mol.

Sobukola *et al.* (2009) estudou a cinética de hidratação de sementes de milho e de feijão-fradinho utilizando o modelo proposto por Peleg. O modelo de Peleg

aplicado pode prever efetivamente a cinética de reidratação das sementes com R^2 variando entre 0,871 e 0,99. Os autores realizaram os ensaios nas temperaturas de 25, 35 e 45 °C. Para minimizar os erros experimentais, os autores estabilizaram os béqueres, a água destilada e as sementes nas temperaturas exigidas em cada experimento. Eles observaram o efeito da temperatura nas constantes do modelo utilizado. Como esperado, houve um rápido período inicial de absorção de água, seguido por uma taxa mais lenta nos últimos estágios do processo de hidratação.

Solomon (2006) realizou o estudo da hidratação das sementes de tremoço (*Lupinus albus*). Segundo Solomon (2006), a hidratação e o conhecimento desse processo é importante, pois tem uma parte integrante das operações de processamento, como cozimento, germinação e fermentação. Para isso, o autor fez testes de imersão em água nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C em banho-maria a temperatura constante por 9 a 12 h. Após a modelagem de Peleg, ele evidenciou que a taxa de absorção de água foi alta no estágio inicial de hidratação (20 a 60 min dependendo da temperatura) seguido por uma diminuição da taxa e, finalmente, aproximando-se da condição de equilíbrio. A equação de Peleg descreveu adequadamente o fenômeno de hidratação das sementes de tremoço na condição experimental, obtendo um R^2 variando de 0,96 a 0,99. As constantes de Peleg demonstraram o aumento da taxa de absorção de água e a diminuição da capacidade de absorção de água com o aumento da temperatura. Tal fato está relacionado à alta taxa de difusão da água em temperaturas mais altas. A alta temperatura resultou em uma alta taxa de absorção de água em comparação com a baixa temperatura evidenciada pela inclinação das linhas particularmente nos estágios iniciais (cerca dos primeiros 60 min) do processo de hidratação.

Verma e Prasad (1999) estudaram a difusão de umidade durante a imersão de sementes de milho em água a temperaturas variando de 30 a 90°C. Segundo os autores, preparar o milho adicionando água é uma parte importante da moagem. A distribuição da umidade dos grãos durante a hidratação é influenciada pela temperatura da água. Dessa forma, é desejável prever a taxa de hidratação em função do tempo e da temperatura. Os dados da hidratação foram ajustados no modelo de Becker para determinar a difusividade de umidade. Becker utilizou a segunda Lei de Fick para correlacionar o ganho de umidade pelo grão de trigo durante a imersão em água. Os coeficientes de difusão variaram na dimensão de 10^{-11}

⁸. Como esperado, houve uma rápida absorção de água no início do processo de hidratação. A rápida absorção inicial de umidade pode ser explicada pela existência de pequenos poros no pericarpo do grão de milho que se tornam saturados pela adsorção, bem como pela ação capilar da entrada de água no grão. Além do modelo proposto por Becker, utilizando os dados obtidos, os autores desenvolveram um modelo matemático para prever o teor de umidade em milho com o tempo.

Costa e Villela (2006) realizaram estudos com o objetivo de avaliar os possíveis ganhos na velocidade de germinação e emergência de plântulas de beterraba. As sementes de beterraba foram condicionadas de sete formas diferentes utilizando três soluções, água destilada, solução de polietileno glicol (PEG) 6000 e solução de MgSO₄. Os autores concluíram que, após a avaliação da germinação aos oito e quatorze dias, o condicionamento osmótico de sementes de beterraba de média e alta qualidade fisiológica proporcionou benefícios ao desempenho das sementes relativamente à velocidade de germinação e de emergência das plântulas. Contudo, a técnica necessita aprimoramento para a espécie, dada à necessidade de adaptação da metodologia de condicionamento aos diferentes lotes produzidos pela indústria de sementes.

2.6. Microtomografia de raios-X

De acordo com Gomes-Junior *et al.* (2014), a microtomografia computadorizada de raios X (micro-TC) é uma técnica não destrutiva que possibilita a obtenção de imagens 3D de pequenos objetos e com alta resolução. Conforme citado por Lasso *et al.* (2008), a construção da imagem tridimensional se deve a captura das seções transversais (cortes internos) dos objetos na forma de imagens bidimensional a partir de projeções da amostra em diferentes ângulos e sua posterior renderização. Na microtomografia emprega-se um fino feixe de raios X (foco < 5µm) e um sistema de detecção e alta resolução, que pode revelar detalhes morfológicos e estruturais internos do material, em escala submicrométrica.

Com o auxílio do equipamento, é possível mapear parâmetros físicos como a densidade e a porosidade de cada região interna do objeto de estudo. Segundo Lasso *et al.* (2008), o princípio de funcionamento do microtomógrafo de raios-X se baseia na propriedade das partes do material de absorver diferentes quantidades de

radiação dependendo de sua composição química e de sua densidade. De tal modo, os elementos presentes na amostra emitem fótons de fluorescência, os quais são detectados pelo equipamento.

O uso da micro-TC para aplicações em estudos sobre sementes é bastante restrito (GOMES-JUNIOR *et al.*, 2014), o que pôde ser confirmado ao buscar estudos de sementes usando tal técnica. Segundo Garcia *et al.* (2018), a micro-TC foi desenvolvida em princípio para estudos aplicados ao campo da medicina. Estes iniciaram-se na década de 90 com o uso de equipamentos customizados, se tornando uma técnica mais acessível e com menor custo a partir de 2000 (LASSO *et al.*, 2008). O uso da análise de imagens em sementes tem evoluído como um recurso tecnológico para avaliação individual (GARCIA *et al.*, 2018). Sendo uma técnica não destrutiva, esta pode ser atrelada aos testes de desempenho, como os testes de germinação e de vigor, relacionando os resultados destes às condições internas.

Segundo Arkhipov *et al.* (2019) ressaltaram que a técnica de micro-TC é utilizada para estudar defeitos ocultos das sementes e investigar seu impacto na qualidade da semente. Contudo, esse processo também é utilizado para outros fins. Na literatura, encontram-se estudos relacionados às áreas de engenharia, de agronomia, de medicina e de odontologia, envolvendo a avaliação da perda óssea experimental em ratos (FERNANDES, 2014), a análise da porosidade em compósito de fibra de vidro com resina vinilester (PEREIRA *et al.*, 2016), o estudo de propriedades físicas do solo (TSENG *et al.*, 2014). A seguir estão citados estudos envolvendo a análise de sementes pela micro-TC.

Gargiulo *et al.* (2020) utilizaram a micro-TC para investigar as características físicas e qualidade das sementes de tomate, a fim de caracterizar mais precisamente sua morfologia. No seu estudo, foi realizado um teste de germinação juntamente com a caracterização morfométrica da estrutura interna da semente de tomate por meio de micro-TC de raios X e análise de imagens 3D. Os autores puderam demonstrar por meio da avaliação visual a relação entre anormalidades internas específicas das sementes e os diferentes resultados de germinação. Para isso, eles utilizaram parâmetros como a % de espaço livre e o diâmetro de Sauter (parâmetros estes considerados mais discriminantes) fossem identificados como os mais eficazes para a predição dos resultados de germinação. A Análise Discriminante do conjunto

de dados morfométricos 3D classificou 96,3% de plântulas normais, 83,3% de sementes não germinadas e 63,6% de plântulas anormais, proporcionando um alto potencial geral de predição de 91,9%. Entretanto, os autores relacionaram a taxa de radiação à germinação, já que observou-se um aumento de plântulas anormais com o aumento do nível de exposição aos raios X. Foram utilizados quatro níveis de exposição aos raios X, sendo que o primeiro e mais baixo nível foi o teste de controle sem exposição à radiação. Contudo, é necessário considerar e investigar com mais profundidade o possível efeito do uso da radiação de raios X tanto na germinação das sementes quanto na plântula.

Gomes-Junior *et al.* (2014) realizaram estudos sobre a estrutura de sementes de soja e de milho, com o objetivo de visualizar a morfologia interna dessas, otimizar o uso da técnica e, de tal forma, relatar as melhores condições para obtenção de imagens de alta qualidade. Para tal, os autores utilizaram o microtomógrafo de bancada SkyScan 1172, o mesmo utilizado no presente trabalho, em diferentes parâmetros de ondas, com e sem filtro de alumínio, rotação angular, rotação total e quantidade de frames. A otimização resultou em imagens com melhor resolução e contraste, mesmo com um tempo de aquisição cerca de uma hora menor que habitual. Com isso, foi possível identificar o cilindro central e dos pontos de acúmulo de lipídio da semente de soja e as partes estruturais do esdosperma, cotilédone e eixo embrionário da semente de milho. Com isso, os autores evidenciaram o potencial tecnológico da micro-TC no estudo de sementes e outros materiais vivos, já que essa técnica, como descrita anteriormente, não degrada os materiais e tecidos. Assim, a técnica pode ser utilizada para diferentes finalidades, como visualização de danos mecânicos ou causados por insetos, tal como anormalidades embrionárias ou outras alterações causadas por agentes bióticos e abióticos.

Ahmed *et al.* (2018) realizaram ensaios utilizando a técnica de micro-TC em sementes naturalmente envelhecidas de melão. As imagens obtidas foram tratadas com aprimoramento de contraste, redução de ruído e segmentação. Após a aquisição e tratamento, as imagens foram utilizadas para identificar características marcantes das sementes. As sementes foram divididas em 2 grupos: viáveis e não viáveis de acordo com suas características morfológicas. Com isso, realizou-se o teste de germinação para avaliar a viabilidade das sementes e as informações foram utilizadas para construir o conjunto de dados para validação dos testes. Para o teste

de germinação, as sementes foram colocadas no papel de germinação e dobradas. Após isso, o papel dobrado foi colocado em uma câmara de germinação a 25 °C e 90% de umidade relativa por 8 dias. Com os resultados dos testes de germinação, os autores obtiveram uma precisão de 98,9% da classificação proposta pela análise discriminatória linear após a visualização morfológica por meio das imagens obtidas. Com isso, chegou-se a conclusão de que a tomografia computadorizada é uma ferramenta potencial para a classificação de sementes com base na caracterização morfológica interna.

Ramachandran *et al.* (2021) utilizaram a tomografia computadorizada de raios-X de alta resolução para visualizar e quantificar o efeito da micronização nas estruturas internas de sementes de soja. A micronização é um processo para reduzir o diâmetro médio de partículas sólidas. Segundo os autores, a eficácia dessas técnicas de processamento depende das mudanças microestruturais que ocorrem nos alimentos à medida que passam pelas operações unitárias. Para isso, utilizaram diferentes tempos de duração da micronização e valores de umidades inicial das sementes de soja. Após o processo, eles utilizaram a micro-TC para avaliar parâmetros estruturais e físicos como porosidade total, alterações volumétricas, densidades de massa e partículas, taxa de secagem e cor. Segundo os autores, todos esses parâmetros apresentaram mudanças significativas à medida que o tempo de micronização e o teor de umidade inicial aumentaram. Observou-se que nas sementes de soja com teores de umidade iniciais mais altos (20 e 24%), ocorreu a formação de rachaduras superficiais e alteração para cor escura após o processo de micronização, mesmo que tenham melhorado a expansão volumétrica e a porosidade total dos grãos de soja, tornando o teor de umidade de 24% inadequado. A soja com teor de umidade inicial de 20%, submetida a 90 s e 120 s de micronização apresentou propriedades comparáveis à soja não processada. Portanto, concluiu-se que os resultados obtidos sobre a microestrutura e os parâmetros de qualidade da soja podem ser utilizados para melhorar os processos de torrefação e secagem assistida por micro-ondas em grãos e leguminosas.

Mendoza *et al.* (2007) realizaram o estudo do espaço poroso de tecidos de maçã por meio da aquisição e processamento de imagens utilizando micro-TC para compreender os fenômenos de transporte de gases que ocorrem nos tecidos vegetais. Com o tratamento das imagens obtidas da esqueletização 3D do espaço

poroso (análise do eixo medial), foi possível determinar os parâmetros físicos e dimensionais, tais como porosidade, área superficial específica, número de volumes de poros desconectados e seus parâmetros de distribuição. Os resultados mostraram que a microtomografia fornece resolução em nível de micrômetro para análise quantitativa e mostra a topologia 3D do espaço poroso no tecido da fruta, sendo que a porosidade calculada se comportou altamente dependente da resolução utilizada no processo de micro-TC.

Barcelon *et al.* (1999) realizaram estudos envolvendo a técnica de microtomografia de raios X para detectar a qualidade de sementes de manga. Para isso, os autores utilizaram como base a relação entre diversas propriedades, tais como densidade, teor de umidade, sólidos solúveis, acidez titulável e pH. Os pesquisadores sintetizaram as informações obtidas por meio de uma equação, a qual relacionava o número de tomografias computadorizadas (TC) e as propriedades físico-químicas com base no princípio da dose de raios X do fruto. Como resultados, concluiu-se que os números de TC das mangas foram positivamente correlacionados com densidade, umidade e acidez dinâmica. Entretanto, as propriedades relacionadas aos sólidos solúveis e ao pH foram inversamente proporcionais ao número de TC. Por fim, os autores concluíram que a microtomografia de raios X pode ser utilizada como uma técnica não destrutiva para aquisição de propriedades relacionadas a qualidade de frutos intactos.

O uso dessa técnica no estudo em questão teve por objetivo conhecer a forma como a água se distribui nos tecidos da semente de Jequitibá-branco, não associando esta aos possíveis danos sofridos pela semente durante o processo de hidratação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização física

A caracterização física permite a análise do comportamento e das propriedades de materiais particulados, pois estas são dependentes da morfologia e tamanho. Tratando de sementes, suas características externas, por não variarem com as condições ambientais, são importantes para identificar a família, gênero e espécie da mesma (GROTH, 1985). Ademais, o conhecimento das características físicas das sementes, visando a uma posterior produção de mudas para recuperar e/ou enriquecer áreas degradadas, resultantes da exploração desordenada dos recursos naturais, é importante para a produção de mudas de qualidade para fomentar programas de recuperação de áreas degradadas (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Segundo a literatura (LOPES *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2018; PAULINO, 2011), é comum o uso de paquímetros e micrômetros para a determinação do tamanho de grãos e sementes a partir da medida das dimensões dos três principais eixos. Como a semente de Jequitibá-branco possui forma irregular, a caracterização de algumas propriedades, como o diâmetro, pode ser dificultada. Desta forma, pode-se utilizar a análise de imagens para determinação do diâmetro de Ferret, sendo este a distância entre um par de retas paralelas tangentes à área projetada externa de uma partícula em uma determinada direção fixa (FREIRE, 2018).

As sementes de Jequitibá-branco foram adquiridas junto à empresa Arbocenter, a qual forneceu atestado de pureza delas em relação à espécie.

Foram selecionadas aleatoriamente 105 sementes na umidade do lote, sendo estas utilizadas para a análise biométrica. Primeiramente, retirou-se as alas das sementes manualmente, conforme proposto por Brasil (2009). Utilizou-se um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm para determinação da espessura das mesmas. Os dados foram submetidos à análise descritiva, com cálculos de média aritmética e desvio padrão.

Com a finalidade de determinar a possível influência da hidratação em mudanças físicas das sementes, fotografou-se um conjunto de vinte sementes, na umidade de lote e após a hidratação, sobre um fundo branco e próximo a uma régua graduada como gabarito. As imagens foram obtidas com uma câmera digital

Motorola, com resolução de 12 megapixels. Com o auxílio do *software* de análise imagens *Image Pro Plus 6*, foi possível determinar os seguintes parâmetros: diâmetro de Ferret médio, perímetro, área superficial projetada e esfericidade. Com os dados obtidos através da análise de imagem foi possível o cálculo do volume considerando a semente uma semiesfera.

3.2. Cinética de hidratação

As cinéticas de hidratação foram realizadas em uma câmara climática da marca Binder, modelo KMF 720, com controle de temperatura e umidade e precisão de 0,1 °C em três temperaturas diferentes: 25 °C, 35 °C e 45 °C.

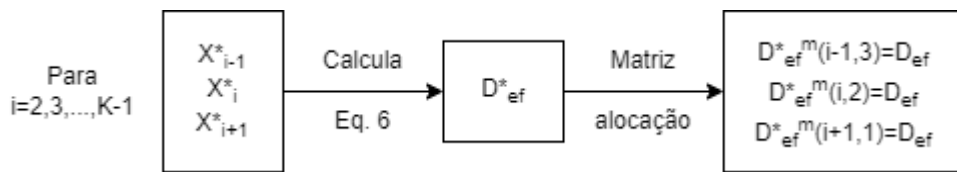
Para cada ensaio de temperatura, foi escolhido aleatoriamente três conjuntos de 20 sementes, um para cada triplicata. Verificou-se se havia alguma semente danificada para garantir a integridade das amostras. Inicialmente, cada conjunto foi devidamente pesado com o auxílio de uma balança digital de precisão 0,0001 g da marca Gehaka e disposto em caixas Gerbox, as quais foram preenchidas com água destilada previamente na temperatura do ensaio. Utilizou-se telas de proteção para garantir que todas as sementes estariam submersas em água. Os recipientes foram fechados com tampas para evitar algum agente externo.

Para a determinação da umidade em diferentes intervalos de tempo, as amostras foram colocadas sobre papel filtro para escoamento da água superficial durante, aproximadamente, um minuto (VERMA *et al.*, 1999). Os intervalos de aferição variaram em 30 minutos nas primeiras duas horas e, após a determinação da fase inicial, entre uma e oito horas do processo. Para determinar o teor de umidade das amostras em cada momento após a imersão, aferiu-se o ganho de massa das sementes nos momentos correspondentes. Durante o processo, nenhuma correção de perda de sólidos foi feita, pois se admitiu que a quantidade de água absorvida foi bem maior que a quantidade de sólidos lixiviados (CUNNINGHAM *et al.*, 2007).

Após admitir que as amostras atingiram o equilíbrio, cada conjunto teve sua umidade inicial definida. A massa seca foi obtida mantendo-se as sementes em estufa com circulação de ar a 105 ± 3 °C por 24 horas (AOAC, 2000) para o cálculo da umidade das sementes em base seca.

Para estimar os coeficientes de difusividades das sementes de Jequitibá-branco durante diferentes etapas da hidratação, a Equação 6 foi ajustada sequencialmente, conforme proposto por Felizardo *et al.* (2020) e demonstrado pela Figura 4. Assim, três tempos de hidratação foram utilizados para determinar a média do coeficiente de difusividade. No tempo $t = 0$, considerou-se que o coeficiente efetivo de difusividade é nulo.

Figura 4 – Esquema dos ajustes sequenciais.



Fonte: Adaptado de Felizardo *et al.*, 2020

3.3. Análise estatística

A análise estatística dos ajustes dos modelos matemáticos foi realizada utilizando o método de mínimos quadrados para ajustar funções não lineares (FELIZARDO *et al.*, 2020).

A análise de resíduos (δ) entre os dados de umidade observados X_{obs}^* e estimados X_{est}^* foi calculada de acordo com a Equação 9:

$$\delta(t) = X_{obs}^* - X_{est}^* \quad (9)$$

A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo teste de chi-quadrado (χ^2).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^* - \bar{X}^*)^2} \quad (10)$$

$$\chi^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^K \delta_i^2}{K - P} \quad (11)$$

Sendo K o número de observações e P o número de parâmetros ajustados.

3.4. Microtomografia de raios-X

O conjunto de cinco sementes de Jequitibá-branco foi colocado em uma caixa Gerbox e esta preenchida com uma solução de iodeto de potássio (KI) com concentração 1% em massa. O uso do marcador tem como vantagem o aumento do contraste entre os diferentes tecidos da semente, produzindo assim imagens de alta qualidade pela micro-TC. Utilizou-se uma tela para conter as sementes, impedindo-as de emergir. Com o auxílio da câmara climática da marca Binder, modelo KMF 720, com controle de temperatura e umidade e precisão de 0,1 °C, foi possível manter o controle de temperatura a 25 °C. Fechou-se o recipiente com tampa para evitar qualquer agente externo.

As amostras foram coletadas para análise em intervalos pré-definidos (1 h, 4 h, 15 h, 26 h e 90 h após o início do processo de hidratação) para averiguar o comportamento da água no interior das sementes em diferentes estágios da umidificação. Após retirar do recipiente, cada amostra foi seca e disposta em um saco do tipo zip lock para esta não perder umidade para o ambiente externo.

Os experimentos utilizando a micro-TC foram realizados em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). As sementes de Jequitibá-branco com diferentes níveis de umidade foram submetidas à análise no micro tomógrafo de raios X SkyScan 1172 do Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação Agropecuária, em São Carlos, SP. O equipamento comercial de microtomografia é utilizado para aplicações na pesquisa agrícola e biológica, o qual permite analisar amostras com diâmetro máximo de 7 cm e altura máxima de 10 cm, com resolução de algumas dezenas de micrômetros para as amostras maiores e a cerca de 1 micrômetro para amostras menores (menos de 1 cm de diâmetro).

Na definição dos parâmetros de aquisição das seções transversais das sementes foram analisadas as resoluções de câmera de 2000 x 1048 pixels (modo 2K) e 4000 x 2300 pixels (modo 4K). Na reconstrução das imagens foi utilizado o software NRecon e foram avaliadas diferentes variações no percentual de correção do artefato de *beam hardening* (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%), além dos

parâmetros de correção de artefato de anel e filtro para redução do ruído, com valores variando de 0 a 20 (GOMES-JUNIOR *et al.* 2014).

Para a avaliação do ganho de umidade dos tecidos considerou-se que quaisquer mudanças de densidade consistiam unicamente do aumento da massa de água. Os histogramas com a distribuição relativa da escala de cinza dos voxels em cada umidade foram obtidos pelo software CTan. Foram desconsiderados voxels de intensidade de cinza inferior a 25, normalmente representativos das regiões com ausência de tecidos (BOVIK, 2009).

Para efeito de padronização foram consideradas as quantidades relativas de voxels de uma dada escala de cinza ponderadas pelo número total de voxels obtidos pela varredura do aparelho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física

A caracterização física foi conduzida conforme descrito na metodologia. As 105 sementes utilizadas no procedimento utilizando o paquímetro estão mostradas na Figura 5.

Figura 5 – Sementes utilizadas para a análise da espessura.

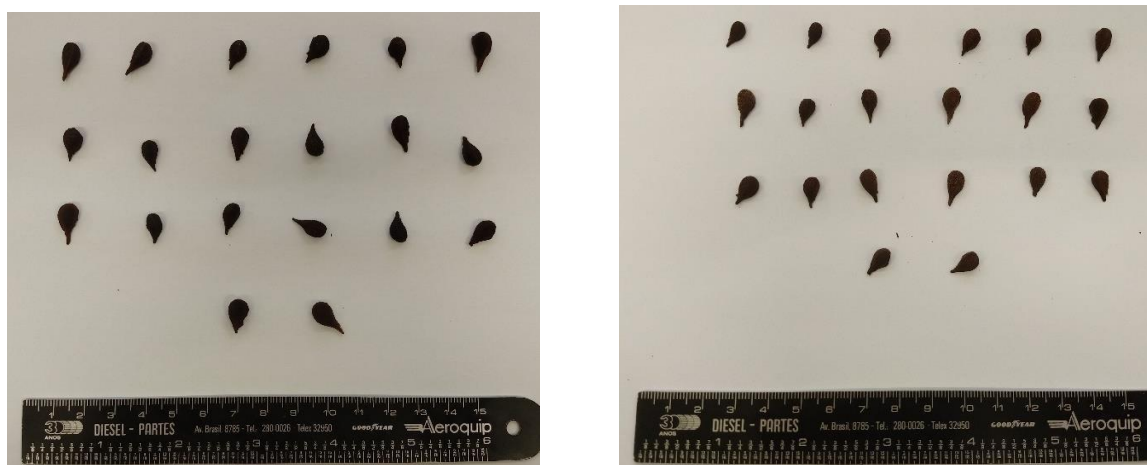


Já o conjunto de vinte sementes submetido à análise de imagens antes e após a umidificação para averiguar se ocorreu mudanças físicas nas sementes durante o processo de hidratação está ilustrado na Figura 6. A Tabela 1 reúne o conjunto de dados obtidos referentes à análise de imagem das sementes de Jequitibá-branco na umidade do lote e após serem umidificadas, incluindo as medidas de espessura.

Levando em consideração o desvio padrão das medidas, observa-se que a umidificação não influenciou significativamente nas dimensões das sementes. Dessa forma, considera-se que a geometria do material permaneceu constante durante o processo de hidratação, indo de acordo à hipótese proposta por Crank (1975). Esse comportamento era esperado, uma vez que sementes de Jequitibá-branco possuem

dispersão alada e têm alta resistência externa contra impactos mecânicos.

Figura 6 – Sementes antes (esquerda) e após umidificação (direita) utilizadas para a análise de imagens.



Brooker *et al.* (1992) relatam que a maioria dos modelos empregados para representar a movimentação de água nos produtos agrícolas foi desenvolvida negligenciando-se a importância da variação volumétrica do produto. Tal simplificação traz uma fonte de erros inerente ao processo, porém visualiza-se a desprezível variação das características físicas das sementes pela interpretação dos dados obtidos.

Tabela 1 – Características médias das sementes em umidade de lote e em umidificação plena.

U (kg/kg)	D_{Fm} (mm)	P (mm)	A (mm ²)	V (mm ³)	ϕ	E (mm)
0,13	8,2 ($\pm 0,9$)	25,8 ($\pm 2,9$)	36,7 ($\pm 6,5$)	86,0 ($\pm 23,8$)	0,7 ($\pm 0,10$)	3,7 ($\pm 0,30$)
0,80	7,9 ($\pm 0,8$)	25,0 ($\pm 2,7$)	33,9 ($\pm 5,6$)	73,2 ($\pm 18,5$)	0,7 ($\pm 0,06$)	3,7 ($\pm 0,30$)

4.2. Cinética de hidratação

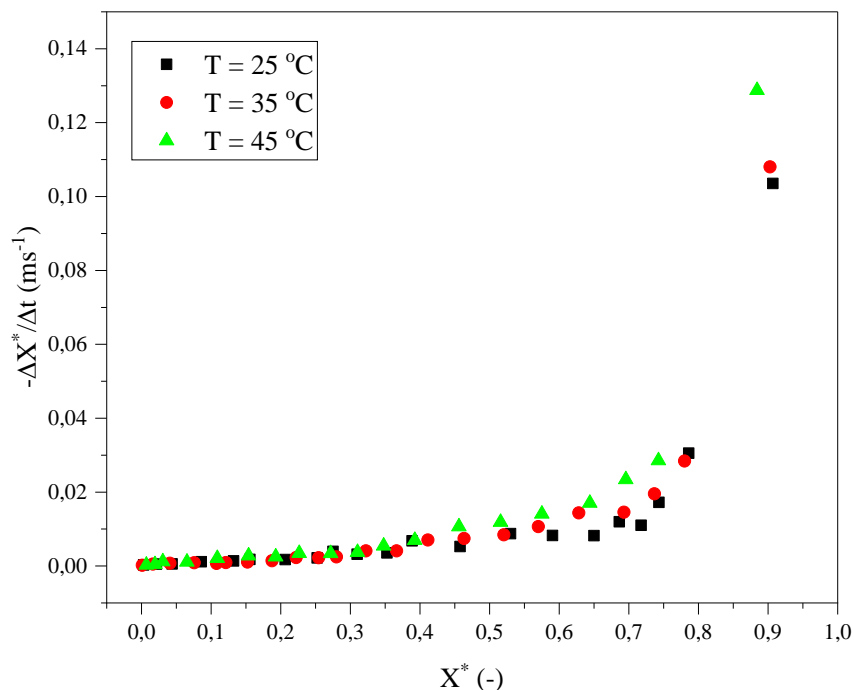
A Figura 7 representa a curva de taxa de hidratação ao longo do tempo para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C. A taxa de absorção de água depende da

diferença entre o teor de água de saturação e o teor de água em um determinado tempo. Assim, ao longo do processo de hidratação ocorre o aumento do teor de água associado à diminuição da força motriz e, conseqüentemente, à redução da taxa de absorção de água.

Interpretando os dados obtidos, observa-se que a cinética de umidificação foi significativamente afetada pela temperatura. O aumento da temperatura resultou em uma mais rápida absorção de água, como observado em diversos estudos envolvendo sólidos particulados (LISBÔA *et al.*, 2015; KAYMAK-ERTEKIN, 2002; BALBINOTI *et al.*, 2017).

Nota-se uma acentuada absorção nos estágios iniciais do processo de hidratação. O comportamento observado pode ser atribuído à presença capilares e cavidades na superfície da semente, cujos sítios são preenchidos rapidamente. A hidratação capilar é muito importante nos estágios iniciais, levando a uma quase captação de água instantânea de água (BROOKER *et al.*, 1992). Com o passar do tempo, o comportamento tende a diminuir, à medida que o teor de água do produto se aproxima da condição de equilíbrio.

Figura 7 – Taxa de hidratação em função da umidade adimensional nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.



Sobre a Figura 7, Maldonado *et al.* (2009), afirmaram que o comportamento hiperbólico das curvas de taxa de hidratação é uma característica de um processo controlado pela difusão.

A taxa de hidratação diminui bruscamente nos primeiros instantes, onde a umidade adimensional é próxima de 1. Na medida em que a hidratação se desenvolve, observa-se uma variação aproximadamente linear da taxa de hidratação com valores ligeiramente superiores para a temperatura de 45 °C até uma umidade adimensional de aproximadamente 0,5. A partir disso, as taxas de hidratação são significativamente baixas e próximas entre si, independente da temperatura. Isso pode indicar que há uma significativa resistência à difusão de água para o interior da semente, quer por resistência mecânica, quer por mecanismos biológicos de proteção contra estresse hidráulico.

4.3. Ajuste do modelo teórico com difusividade constante

O ajuste matemático do modelo proposto considerando difusividade constante foi feito com o auxílio do programa Excel com aproximação da série de solução analítica por 25 termos. A partir de $N = 20$, o aumento do número de termos na série tem pouco efeito sobre a qualidade do ajuste e sobre a estimativa da difusividade efetiva da hidratação (MERLO *et al.*, 2019).

A partir do ajuste pelo método dos mínimos quadrados, definiu-se os valores dos coeficientes de difusão líquida efetiva para as três temperaturas. Os ajustes do modelo aos dados experimentais de hidratação estão representados na Figura 8. Os valores ajustados de difusividade e os parâmetros estatísticos χ^2 e R^2 estão indicados na Tabela 2.

Observa-se o efeito positivo da temperatura na absorção de água, com o aumento da difusividade efetiva de água com o aumento da temperatura. O aumento da temperatura não apenas interfere na viscosidade da água. Tal propriedade está diretamente relacionada à resistência do fluido ao escoamento. Com isso, tais variações afetam a difusão de água nos sítios das sementes, favorecendo a movimentação do fluido no material.

Outro fator ao qual pode ser atribuída esta variação do coeficiente efetivo de difusão líquida é que, com o aumento da temperatura, aumenta a energia cinética

das moléculas de água, o que contribui para uma difusão mais rápida do fluido no interior das sementes.

Porém, estudos relatam o comportamento reversivo em temperaturas acima de 60°C, causando um efeito negativo da temperatura na taxa de absorção de água (CUNNINGHAM *et al.*, 2008).

O processo de hidratação tratando a difusividade efetiva como constante pode acarretar desvios por considerar a média de duas etapas do processo de hidratação. Relatado por Khazei *et al.* (2009), a cinética da absorção de água consiste nas etapas de difusão e de relaxamento, sendo a primeira fase com rápida taxa absorção de água e a segunda com baixa taxa de absorção. Estes períodos representam mudanças nos fenômenos de transporte devido às diferentes interações da água com o material.

Entretanto, o processo de hidratação até as condições de saturação de umidade demorou cerca de 90 h em qualquer temperatura. Isso significa que a hidratação das sementes de Jequitibá-branco é um processo bastante lento quando comparado com sementes como o milho (VERMA E PRASAD, 1999). Enquanto as sementes de milho atingem um platô de hidratação por volta de 20 minutos, sementes de Jequitibá-branco o fazem em 3,75 dias. Isso acontece, pois, as sementes de Jequitibá-branco possuem estruturas internas e externas que as protegem tanto de impactos mecânicos quanto do estresse hídrico. Conforme dito anteriormente, a casca dessas sementes é significativamente resistente, o que resulta em um tempo considerável para a captação de água pela semente.

Esse fato também pode ser corroborado pelos baixos valores de difusividade efetiva calculados através do ajuste do modelo difusivo considerando-a constante. Ainda que a difusividade efetiva aumente na medida em que a temperatura aumenta, seus valores são da ordem e 10^{-11} , enquanto que para o milho, em situações similares, a difusividade efetiva é da ordem de 10^{-7} (VERMA E PRASAD, 1999).

Figura 8 – Ajustes matemáticos do modelo de difusão com difusividade efetiva constante para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.

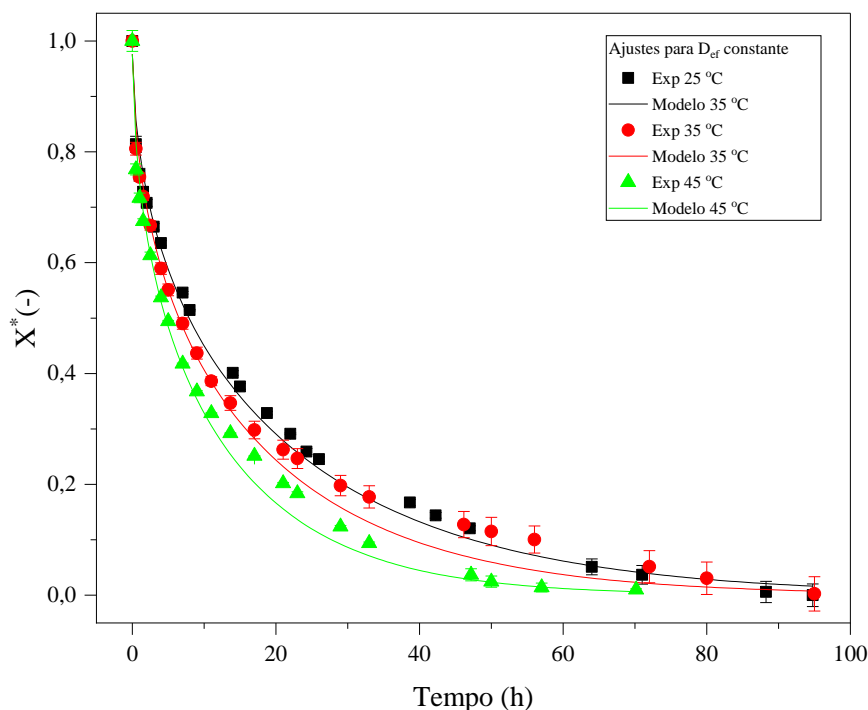


Tabela 2 – Coeficientes de difusividade efetiva e análise estatística.

T (°C)	D_{ef} (m^2s^{-1})	χ^2	R^2
25	1,64E-11	4,93E-4	0,996
35	2,06E-11	6,61E-4	0,995
45	2,70E-11	5,34E-4	0,996

Ainda que seja um parâmetro de significado físico vago devido à grande quantidade de fenômenos aglutinados em uma única propriedade, a difusividade efetiva pode nos auxiliar na compreensão do efeito conjugado desses fenômenos e permitir uma análise adequada do fenômeno de hidratação. Contudo, admitir esse valor como constante durante todo o processo de hidratação pode mascarar possíveis mudanças nos efeitos conjugados responsáveis pela manutenção do transporte de água para o interior da semente.

Dessa forma, uma análise que permita a determinação da difusividade efetiva

ao longo do processo de hidratação pode ser uma ferramenta importante para efeito de análise do comportamento da hidratação ao longo do tempo.

4.4. Ajuste do modelo teórico com difusividade variável

Para a determinação da difusividade efetiva de água no processo de hidratação, modelou-se o problema utilizando a técnica de ajuste sequencial e parcial da solução analítica da Segunda Lei de Fick.

Para isso, foram utilizados três diferentes tempos de hidratação sequenciais, sempre repetindo os dois últimos valores do conjunto para o cálculo do coeficiente de difusividade efetivo posterior conforme descrito na metodologia. Os gráficos da Figura 9 representam os dados experimentais e a curva do ajuste para a condição de difusividade efetiva variável.

Figura 9 – Ajustes matemáticos do modelo de difusão com difusividade efetiva variável para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.

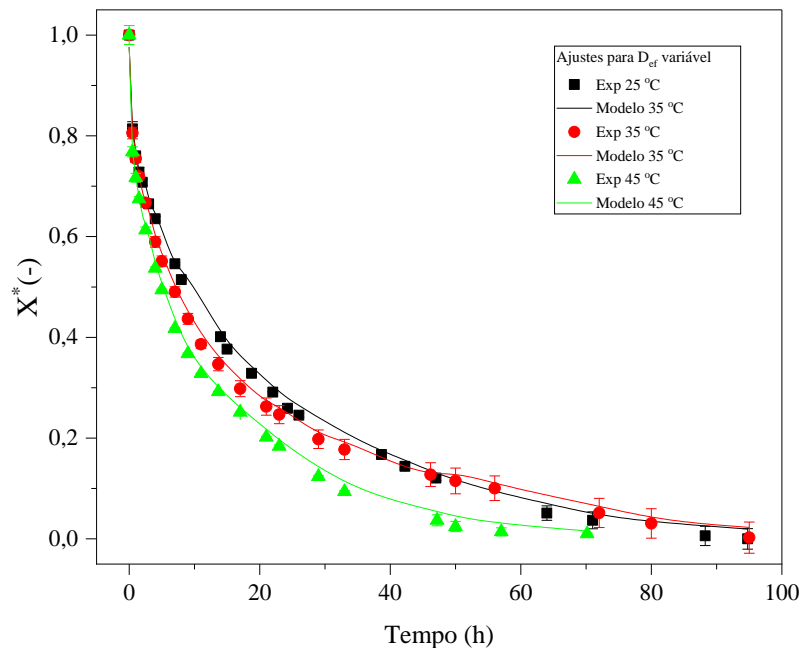


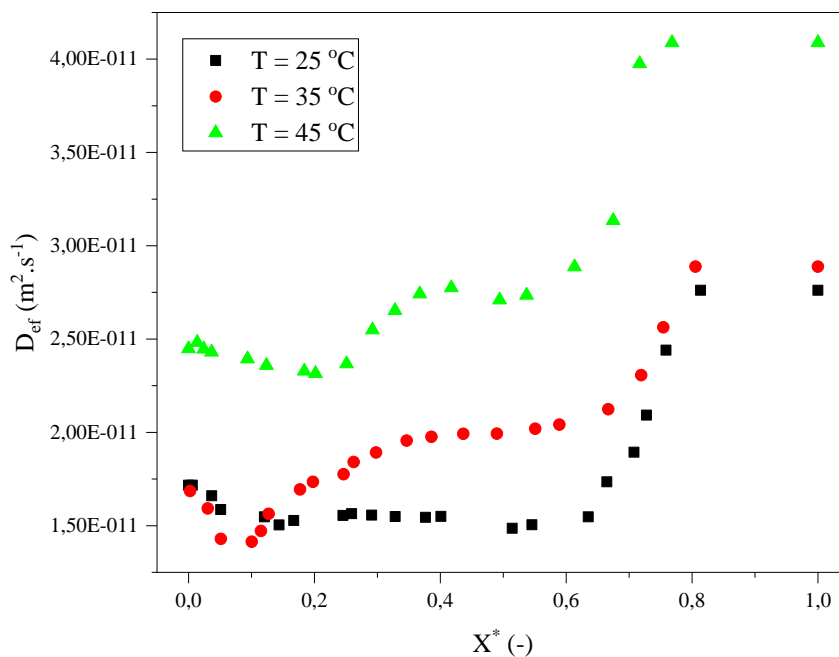
Tabela 3 – Parâmetros da análise estatística para o ajuste do modelo com difusividade variável para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.

T (°C)	χ^2	R ²
25	2,64E-4	0,999
35	2,23E-4	0,999
45	2,82E-4	0,999

Através da Tabela 3 observou-se que a qualidade do ajuste para o modelo considerando a difusividade efetiva variável é significativamente superior ao ajuste para o modelo com difusividade efetiva constante. O parâmetro χ^2 diminuiu de 4,93E-4 para 2,64E-4, 6,61E-4 para 2,23E-4 e 5,34E-4 para 2,82E-4 nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C, respectivamente. O coeficiente de correlação também foi superior em todas as temperaturas avaliadas.

A Figura 10 representa o comportamento da difusividade efetiva em relação à umidade adimensional para as temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.

Figura 10 – Variação da difusividade no processo de hidratação nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.



Uma característica que pode ser observada em relação à variação de difusividade efetiva com a umidade adimensional é uma maior sensibilidade da semente à temperatura de 45 °C. Conforme observado na Figura 10 ao aumentarmos a temperatura de 25 °C para 35 °C existe um aumento nos valores de difusividade efetiva menos significativo do que o observado ao aumentarmos a temperatura de 35 °C para 45 °C.

Isso pode ter relação com o fato de que as temperaturas de 25 °C e 35 °C são mais facilmente encontradas nas regiões onde o Jequitibá-branco germina. Temperaturas superiores, além de fornecerem mais energia para os processos de difusão da água no interior da matriz biológica da semente, podem ativar mecanismos de defesa da semente contra o estresse térmico, diminuindo a resistência ao trânsito de água no seu interior para garantir a sobrevivência das estruturas germinativas e dos tecidos de reserva. Não é possível determinar, entretanto, se é o conjunto desses efeitos que resulta no comportamento observado ou se é apenas um deles individualmente, muito embora haja indícios de um efeito conjunto.

A análise da Figura 10 também mostra que para as três temperaturas observadas a semente apresenta uma etapa inicial com difusividade efetiva diminuindo de forma aproximadamente linear até uma umidade adimensional de cerca de 0,6. Considerando que a umidade adimensional com valor 1 representa o fenômeno no seu ponto mais distante do equilíbrio, ou seja, com o teor de umidade mais baixo antes da umidificação, essa diminuição da difusividade efetiva acontece de maneira mais significativa até uma umidade adimensional de 0,6.

Abaixo desse valor, caminhando para a condição de maior umidade, a semente passa por um estágio onde a difusividade diminui de maneira menos intensa, até uma umidade adimensional de 0,2. Isso pode representar o fato de que os sítios de adsorção mais externos foram preenchidos e a água encontra maior dificuldade para alcançar os tecidos internos da semente.

O comportamento observado está de acordo com aquele apresentado por Khazei *et al.* (2009), de forma que a cinética da absorção de água apresenta as etapas de difusão e de relaxamento, sendo a primeira fase com rápida taxa absorção de água e a segunda com baixa taxa de absorção.

De acordo com Hadas (2005), a absorção de água pelas sementes secas é caracterizada por três fases: a fase inicial – a fase de embebição – é caracterizada por um padrão de cinética de saturação; a segunda fase – a fase de transição – é caracterizada por uma taxa de absorção de água baixa a insignificante; e a terceira fase – a fase de crescimento – é caracterizada por um aumento rápido e exponencial da taxa de absorção de água, acompanhado pela emergência da radícula. As duas primeiras fases são observadas em sementes mortas, inertes e viáveis, enquanto a fase de crescimento é exclusiva de sementes viáveis para germinação.

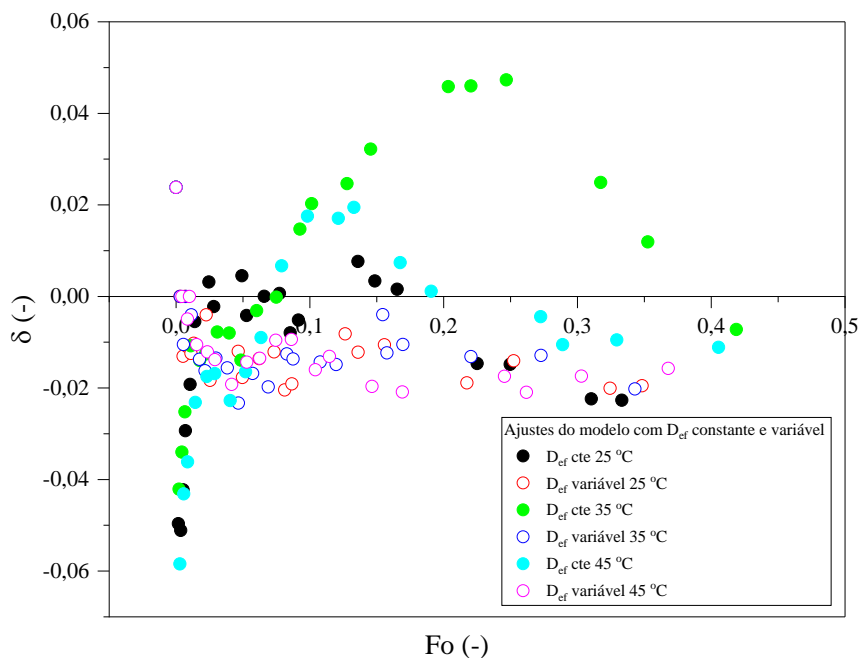
A partir de uma umidade adimensional de 0,2 para a temperatura de 45 °C e 0,1 para as temperaturas de 25 °C e 35 °C, ocorre um fenômeno de aumento nos valores de difusividade efetiva até a semente estar completamente saturada de umidade. Esse efeito contradiz a ideia de que à medida que se caminha para a saturação de umidade no interior da semente, a água deveria encontrar maior resistência ao transporte, uma vez que a maioria dos sítios de adsorção já se encontraria ocupada. Essa análise depende do conhecimento de como a água se distribui no interior da semente e se a condição de meio isotrópico é pertinente.

Para efeito de uma análise estatística adicional aos modelos empregados, foi feita uma análise da distribuição de resíduos em função do tempo adimensional.

O gráfico da Figura 11 evidencia a não aleatoriedade dos resíduos em todas as temperaturas estudadas, caracterizando um sistema com baixa homocedasticidade para o Model 1, que considera a difusividade efetiva constante ao longo do processo. Na prática, isso significa que apesar dos coeficientes de correlação elevados e dos baixos valores de chi-quadrado, o modelo proposto não representa o fenômeno analisado. Isso pode ter acontecido pela suposição de difusividade constante ao longo do processo de hidratação.

Ao analisarmos a distribuição de resíduos para o modelo com difusividade efetiva variável (Model 2), foi possível observar que os valores são significativamente menores do que os encontrados quando se adota o modelo de difusividade constante.

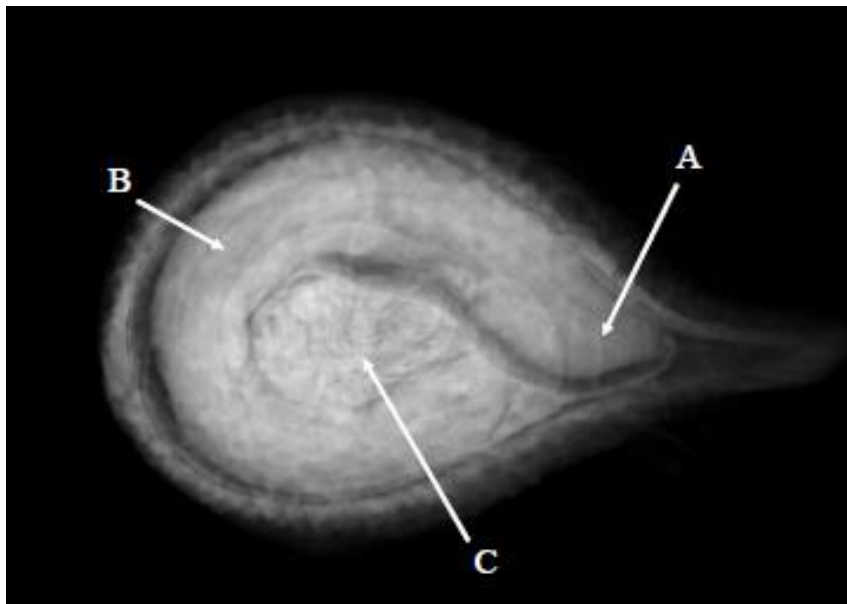
Figura 11 – Distribuição de resíduos em função do número de Fourier para os ajustes do modelo com D_{ef} constante e variável nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C.



4.5. Análise de imagens por microtomografia

A semente de Jequitibá-branco é do tipo obovado, plano-convexo; extremidade micropilar aguda; provida de fina asa unilateral papirácea, com expansão da testa de comprimento variável na região da rafe e pré-rafe, contendo feixe funicular; micrópila situada na extremidade aguda do núcleo seminífero e hilo pequeno, lateral, localizado no terço final do dorso da asa; chalaza marrom-escura localizada no ápice da semente. A superfície da semente é rugosa, opaca, de coloração marrom-clara, com estrias longitudinais. Embrião axial longo, constando do eixo hipocótilo-radícula, com cotilédones amarelo-claros e foliáceos, imbricados, finos, amplamente expandidos, plicados, formando pregas bastante acentuadas. (RÊGO E POSSAMAI, 2001). A Figura 12 apresenta uma imagem em escala de cinza de um corte transversal obtida do plano central de uma semente de Jequitibá-branco.

Figura 12 – Imagem de micro-TC em corte transversal no plano central para uma semente de Jequitibá-branco representada em escala de cinza. A: feixe vascular; B:eixo hipocótilo-radicular; C: endosperma primário.

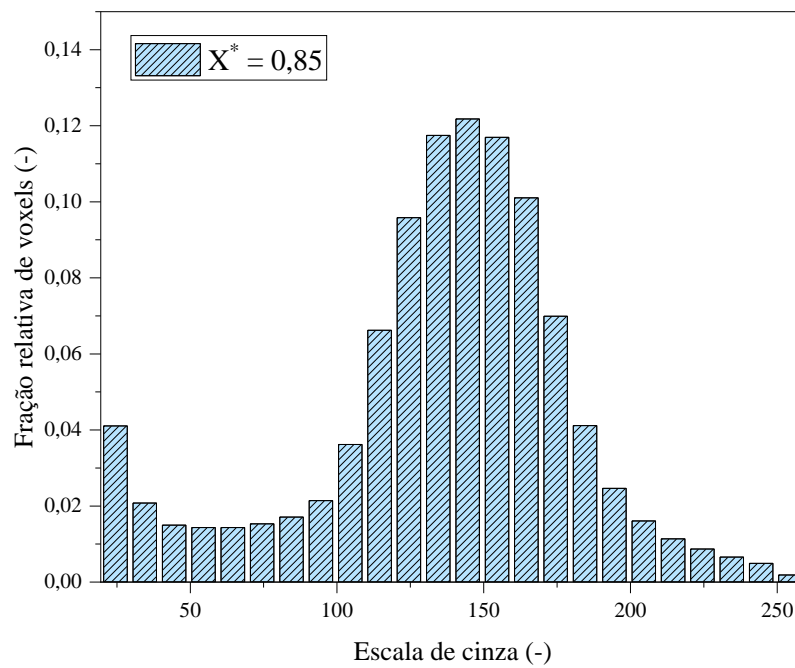
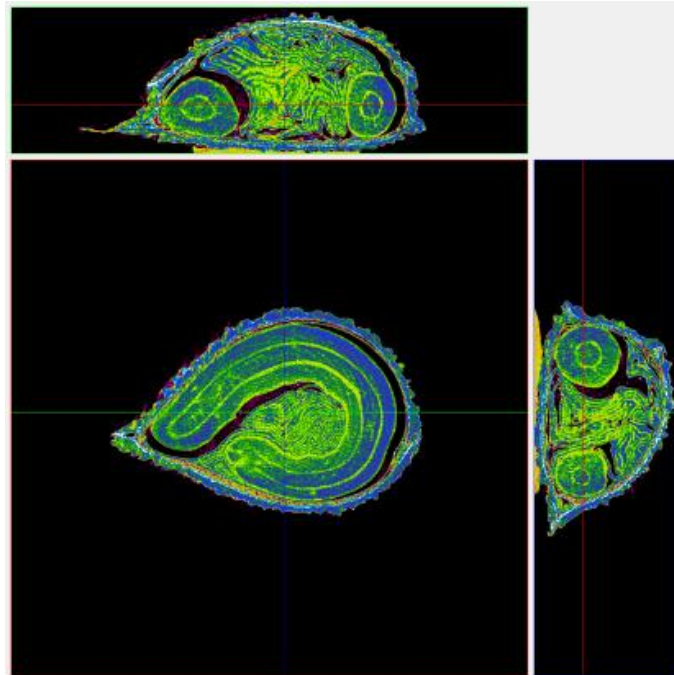


A obtenção de imagens da morfologia interna de sementes com a utilização da microtomografia de raios X possibilitou avaliar a distribuição de água no interior das sementes, diferenciando a quantidade de água localizada nos tecidos do material.

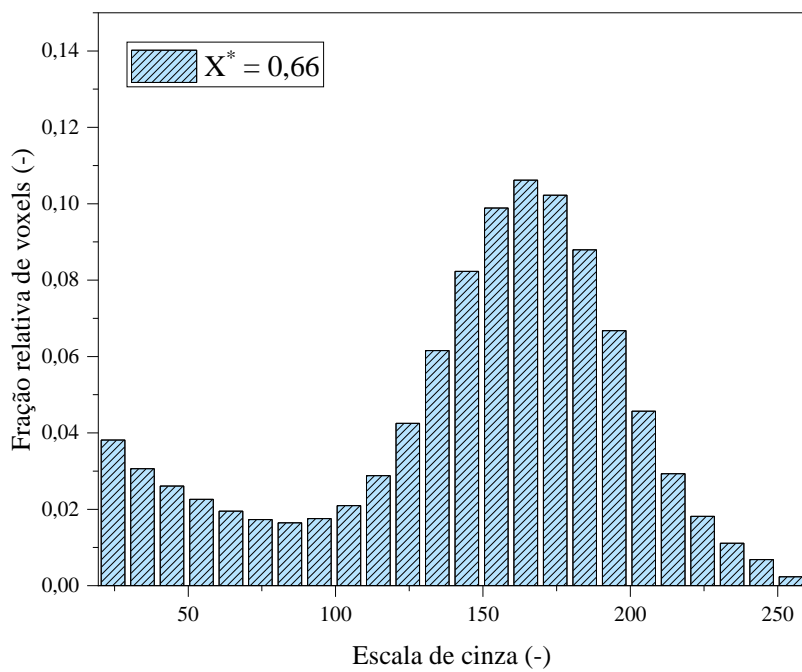
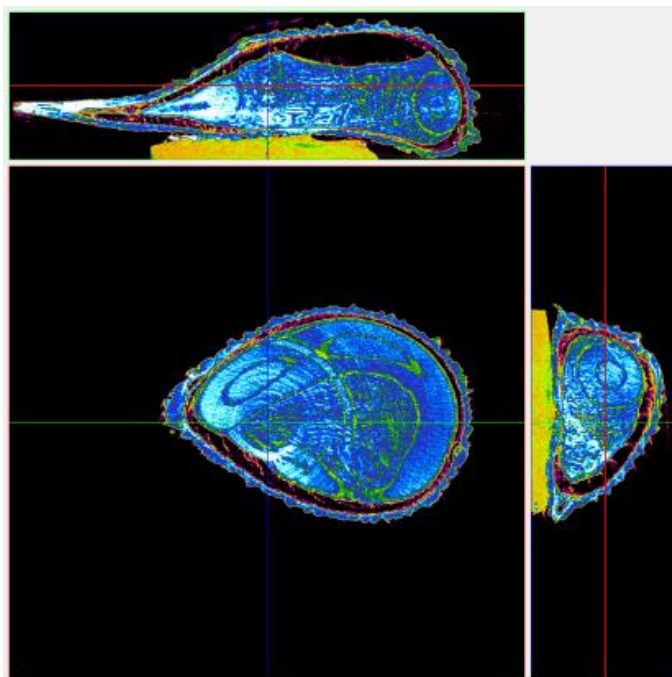
O método produz uma significativa quantidade de imagens. Para efeito de análise foram consideradas aqui imagens de três planos das sementes em cinco umidades distintas. As imagens estão apresentadas na Figura 13.

Uma das bases conceituais do modelo de cinética de hidratação adotado considera o meio como sendo isotrópico. Entretanto, ao visualizar as imagens de microtomografia, percebe-se que a semente é composta por vários tecidos, com diferentes capacidades de absorção de água.

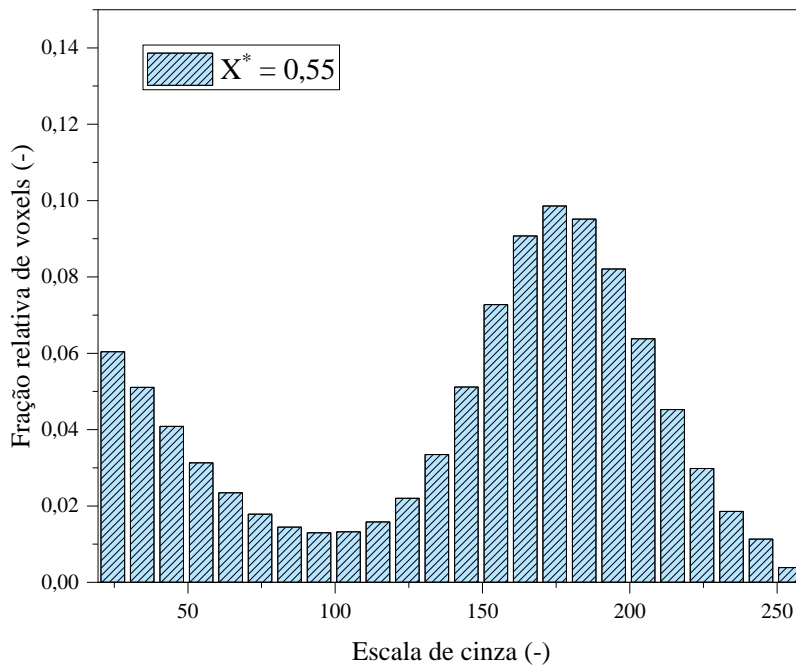
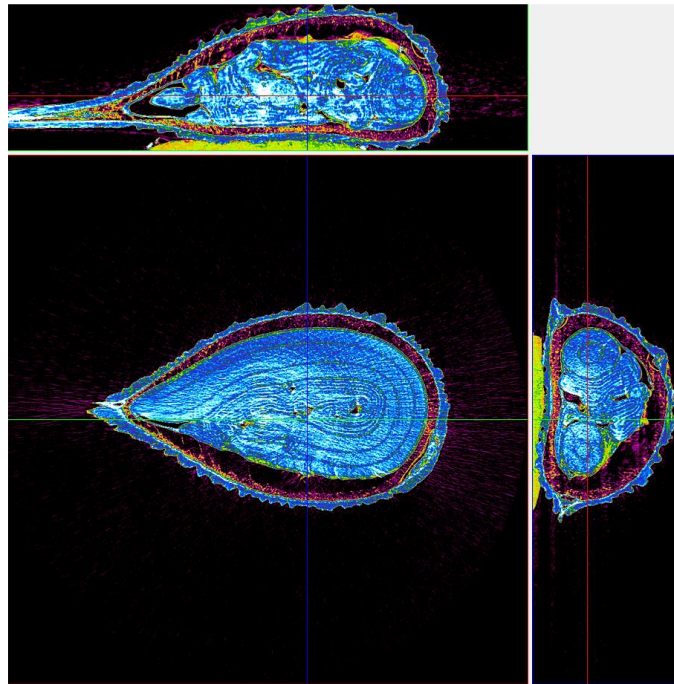
Figura 13 – Distribuição da escala de cinza em diferentes umidades; imagens de micro-TC transversais e longitudinais do plano central em diferentes umidades.



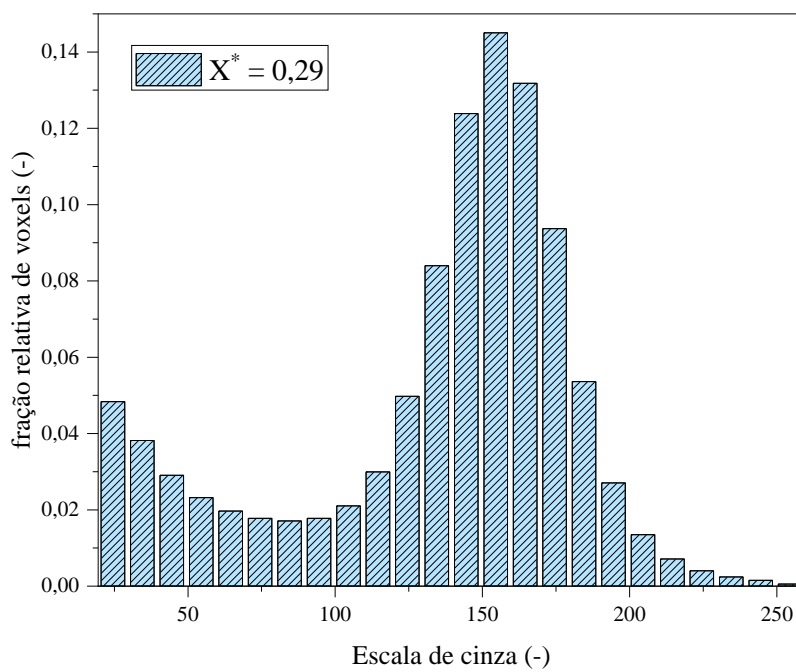
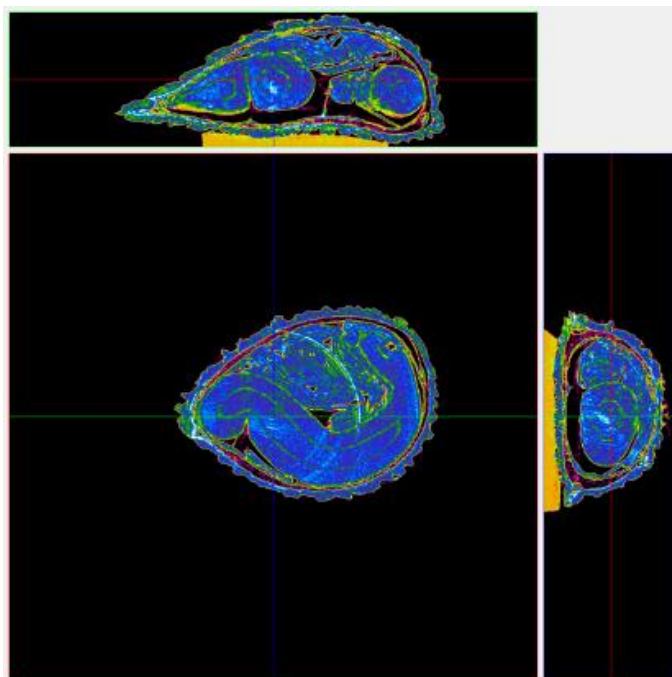
(a)



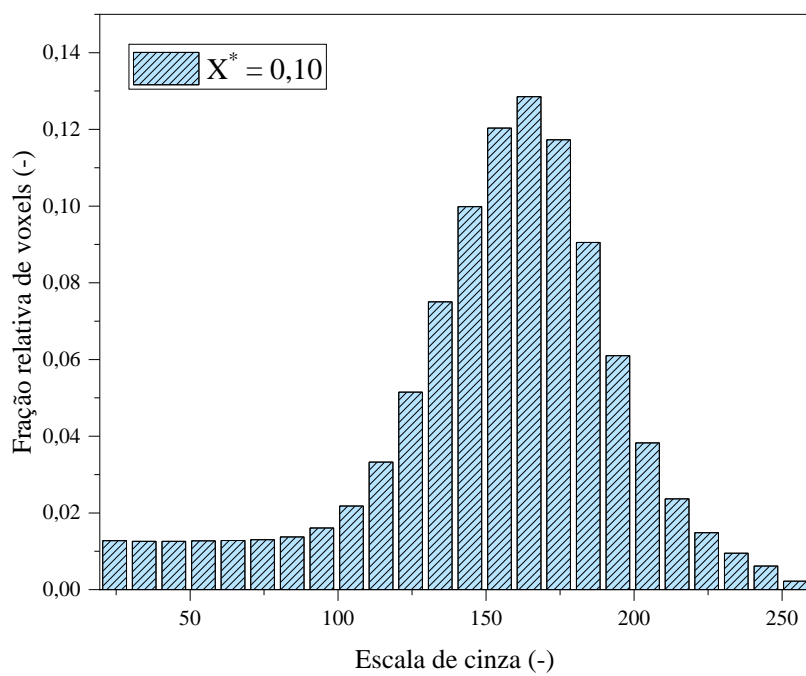
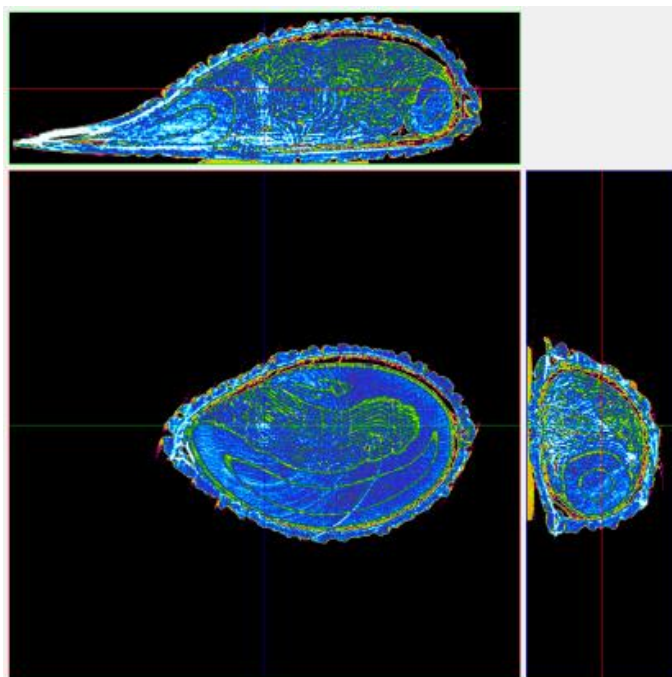
(b)



(c)



(d)



(e)

A Figura 13 fornece um panorama das distribuições normalizadas dos valores de escala de cinza para as imagens obtidas por micro-TC das sementes em diferentes níveis de hidratação. As imagens foram submetidas a contraste de cor para visualização das diferentes densidades dos tecidos. A densidade dos tecidos aumenta de acordo com a sequência cromática: preto, violeta, rosa, vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e branco.

A análise das imagens da Figura 13 nos fornece alguns esclarecimentos importantes. Inicialmente, podemos observar que independente da umidade final da semente, foi possível observar tecidos com diferentes quantidades de água. De acordo com a escala de cores adotada, regiões nas cores preto, púrpura e rosa apresentam menor densidade, enquanto cores azuis escuras, azuis claras e brancas apresentam maior densidade.

Na umidade de 0,25 kg/kg podemos observar regiões na cor verde, indicando menor densidade em relação às imagens de sementes em umidades maiores. É importante destacar que existem tecidos e/ou espaços intersticiais que praticamente não apresentam umidade. Isso pode indicar a presença de órgãos internos altamente hidrofóbicos. Por ser uma semente de distribuição alada, é possível identificar que esses tecidos desempenham uma função de proteção mecânica das partes mais sensíveis da semente, como o embrião.

Na medida em que a umidade no interior da semente aumenta, pode-se observar uma mudança na tonalidade dos tecidos internos para azul escuro, azul claro e algumas regiões esbranquiçadas, caracterizando uma concentração de água comparativamente maior. Entretanto, mesmo em umidades elevadas, a presença de tecidos com baixa densidade e, portanto, baixa captação de água, podem ser observados.

Nas imagens em contraste foi possível observar a presença de regiões da semente com ausência de tecidos internos. O que seria um problema severo em sementes agrícolas como o milho e a soja, não representa risco para sementes de Jequitibá-branco. Por apresentar distribuição anemocórica e possuir um endosperma primário relativamente pequeno em comparação ao eixo hipocótilo-radicular, a presença de espaços vazios no interior da semente não resulta em inviabilidade germinativa, mas aumenta a proteção contra impactos mecânicos, além de promover espaço para o intumescimento dos tecidos com consequente ganho de densidade e

volume, impedindo que a resistência externa da casca atue comprimindo os tecidos internos durante o processo de hidratação com possíveis impactos deletérios sobre a estrutura interna da semente.

A presença desses espaços é particularmente evidente nas sementes que correspondem às umidades relativas de 0,85 a 0,29, com especial destaque para a semente avaliada na umidade de 0,66. Mesmo com uma grande depressão na sua parte superior, a estrutura interna pode ser observada sem quaisquer tipos de injúrias que promovam a inviabilidade do embrião. Apenas na umidade relativa de 0,1 é possível observar que os tecidos internos da semente preencheram eventuais espaços vazios entre eles devido à hidratação.

As tonalidades predominantemente verdes observadas para $X^*=0,85$ indicam regiões dos tecidos internos com menor densidade quando comparadas às áreas em azul. Foi possível observar para a semente ainda seca que a distribuição de umidade no interior da semente é heterogênea e o meio não é isotrópico. O correspondente histograma para a distribuição das tonalidades de cinza indica uma maior concentração de voxels na região cinza entre 130 e 160. Foi possível observar também que parte dos tecidos que constituem o hipocótilo radicular apresentam densidades já na faixa do azul, portanto, mais densas que as regiões ocupadas pelo endosperma primário.

A hipótese de que estas sementes constituem um meio isotrópico e que o transporte de água se faz de maneira homogênea no seu interior é refutada imediatamente na primeira comparação em relação ao histograma e a imagem em contraste para $X^* = 0,66$. Nessa etapa, a hidratação promove evidente aumento na densidade do endosperma primário. Mesmo que o eixo hipocótilo radicular apresente mudança de densidade observável comparativamente à imagem para $X^* = 0,85$, quem governa o processo de absorção de água são os tecidos que constituem o endosperma primário. Além disso, o histograma da escala de cinza nos mostra que há um deslocamento para a direita, indicando um aumento no número de voxels com densidade maior, caracterizando um aumento médio na densidade da semente como um todo.

Essa observação colocaria em xeque as condições adotadas para a solução do modelo difusivo. Entretanto, considerando que os ajustes, sobretudo os realizados para difusividade efetiva variável, apresentaram bons coeficientes, ainda

que o meio não seja de fato homogêneo e isotrópico, essa consideração não promove imprecisões significativas no ajuste a ponto de inviabilizar o emprego do atual modelo.

Destaca-se também um efeito inesperado observado no histograma para $X^* = 0,29$ comparativamente ao imediatamente anterior para $X^* = 0,55$. Ocorre uma diminuição no número de voxels de maior densidade, notadamente na região de escala de cinza entre 200 e 250. Considerando que esse comportamento se repetiu em todos os histogramas provenientes da análise de imagens das triplicatas nessa faixa de umidade, descartou-se a possibilidade de erro experimental. Conforme já mencionado, ainda que as sementes sejam distintas, a análise das suas características morfológicas fornece subsídios para que a distribuição dos voxels possa ser comparada do ponto de vista qualitativo. Desse modo, ocorre a diminuição da densidade de alguns tecidos e um ganho potencializado de densidade representado pelo número de voxels na região da escala de cinza entre 130 e 170.

Hadas (2005) nos sugere uma possível explicação para este comportamento. Segundo o autor, durante a fase de transição (fase 2), também conhecida como “fase de pausa”, a taxa de hidratação da semente, a taxa de respiração e a morfologia aparente permanecem quase inalteradas. No entanto, uma variedade de processos metabólicos é ativada, e diferenças nos níveis de atividade desses processos e em sua ordem de ocorrência têm sido observadas entre sementes de diferentes espécies e entre sementes que atingiram diferentes níveis de hidratação. Portanto, a ativação dos processos metabólicos na fase 2 pode ter contribuído para uma diminuição na densidade de alguns tecidos, mesmo com um aumento da umidade total.

A identificação do teor de umidade que desencadeia os processos metabólicos de germinação em uma dada espécie é de grande importância no sucesso do processo germinativo. Ainda segundo Hadas (2005), quaisquer condições ambientais adversas que levem ao ressecamento das sementes, por exemplo, por submetê-las ao estresse hídrico, ou redução da área de contato semente-solo e, assim, influenciar seus níveis de hidratação, podem prejudicar, retardar ou mesmo inibir a germinação.

Por se tratar de um efeito biológico, modelos de transferência de massa não são capazes de identificar essas mudanças, uma vez que do ponto de vista

macroscópico a semente continua a ganhar massa, muito embora esse ganho de massa não se traduza em mudança uniforme de densidade nos tecidos internos da semente. Nesse sentido, o estudo da cinética de hidratação associado à análise de imagens por micro-TC podem ser ferramentas promissoras na análise de fenômenos que não podem ser medidos ou observados apenas pelo conhecimento sobre transferência de massa, mas que necessitam da análise biológica do fenômeno. Essa análise é particularmente importante em processos como o condicionamento osmótico de sementes.

Segundo Arun *et al.* (2022) o condicionamento de sementes permite o desenvolvimento dos processos metabólicos necessários para melhoria da taxa de germinação e a qualidade da semente através do gerenciamento do teor de umidade e a controle de temperatura de forma a conduzir a semente através dos processos bioquímicos iniciais dentro dos estágios iniciais de germinação, mas impedindo a transição da semente para a germinação completa. Segundo os autores isso garantirá melhor emergência em campo e resistência a doenças sob várias condições adversas. O objetivo do *priming* é reduzir o tempo de germinação e melhorar o padrão e a porcentagem de germinação em condições ambientais desfavoráveis.

Por fim, podemos também observar que em nenhum nível de hidratação a semente sofreu qualquer injúria em seus tecidos internos, e que na faixa de temperatura estudada, o processo de hidratação não compromete a integridade dos tecidos internos.

A análise de imagens não permite inferir qual efeito exerce maior influência na distribuição irregular de água no interior da semente, seja a atividade regulatória de água no interior da semente, seja a estrutura interna e a atividade funcional dos tecidos ou uma combinação de ambos os fatores. É importante ressaltar que as sementes se encontravam vivas durante o experimento e os mecanismos de defesa contra estresse hídrico estariam ativos.

Isso pode explicar a distribuição irregular de resíduos observada na análise estatística do ajuste para o modelo com difusividade efetiva variável. O meio definitivamente não é isotrópico, mas, aparentemente, as condições de gradiente de concentração desprezível no interior da semente não afetaram negativamente o ajuste.

Uma das possíveis justificativas para esse comportamento pode estar no fato de que a difusividade efetiva é muito baixa em relação à difusividade efetiva de água observada em sementes agrícolas, como soja e feijão, da ordem de 10^{-8} m²/s. As análises de imagem mostram que as sementes de Jequitibá-branco possuem, além dos tecidos de proteção, um embrião significativamente desenvolvido em relação ao seu endosperma, enquanto as sementes agrícolas citadas apresentam uma morfologia oposta, com um embrião significativamente menor do que seu endosperma.

Essa difusão de umidade lenta pode ocasionar um efeito onde a distribuição de água nos (intra) tecidos seja significativamente mais rápida do que a o processo de difusão entre os tecidos, caracterizando uma absorção de água nos tecidos mais rápida do que o transporte através das camadas, gerando um efeito similar ao de ausência de gradiente de umidade no interior do grão.

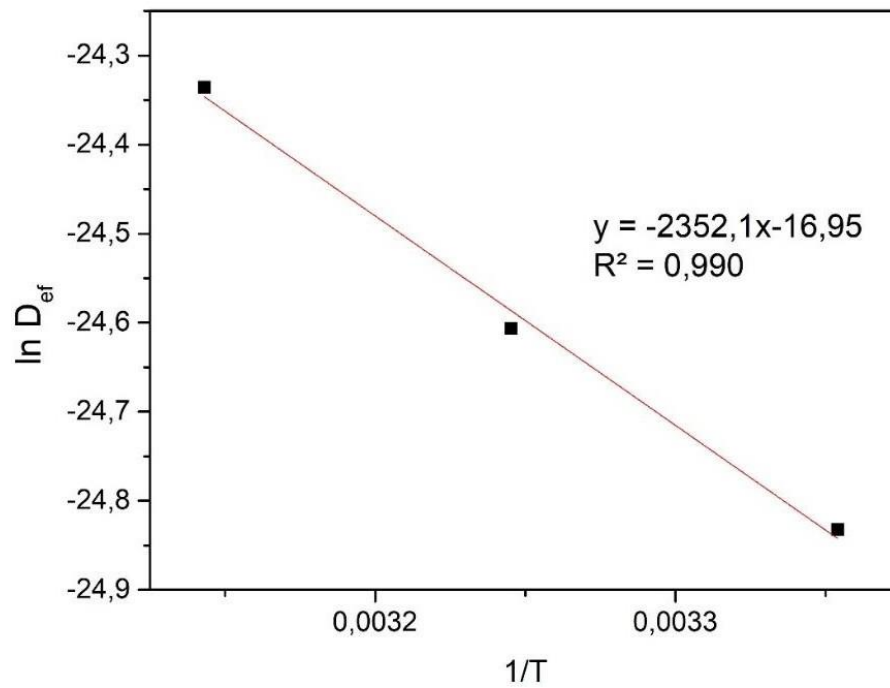
Por outro lado, fica evidente que a contribuição dos mecanismos de defesa contra estresse hídrico bem como a presença de tecidos hidrofóbicos exigiria uma análise do número de Biot para maiores esclarecimentos sobre a natureza desse adimensional. É possível que um modelo que considere o número de Biot suficientemente elevado possa exibir um ajuste que ao mesmo tempo apresente elevado coeficiente de correlação e uma maior aleatoriedade nos resíduos. Entretanto essa análise não foi realizada no presente estudo e fica como sugestão de continuidade para próximos trabalhos.

4.6. Energia de ativação

A energia de ativação é definida como a barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no material. Ajustando a equação proposta por Arrhenius com os valores obtidos de coeficientes de difusividade efetiva nas três temperaturas de ensaios, obteve-se a energia de ativação igual a 19,5 kJ.mol⁻¹. Nos processos de hidratação, quanto maior a energia de ativação, menor será a difusividade de água no produto, pois a barreira para o processo de difusão ocorrer será maior. Comparando com estudos envolvendo sementes feijão (RESENDE *et al.*, 2007), os autores encontraram um valor de 6,748 kJ. mol⁻¹ para energia de ativação, cujo processo de hidratação que dura cerca de 50

h. Confirmando a teoria, em sementes de alpiste, Lisbôa *et al.* (2015) encontraram um valor de $39,239 \text{ kJ.mol}^{-1}$, sendo que o coeficiente de difusividade efetiva do material estudado varia de $2,396$ até $2,428 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Figura 14 – Ajuste para determinação da energia de ativação pela representação de Arrhenius.



5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Pela caracterização física foi possível observar que as sementes secas de Jequitibá-branco apresentam significativa uniformidade de tamanhos. Isso pode ser constatado pelos baixos desvios calculados para as dimensões estudadas. Adicionalmente, o baixo desvio associado às medidas de diâmetro médio de Feret também sugere que as sementes apresentam formato homogêneo, não diferindo entre si em tamanho e em forma de maneira significativa. A hidratação não promoveu mudanças significativas nas dimensões estudadas.

Os modelos propostos para as cinéticas de hidratação não representaram o fenômeno analisado. Ao analisarmos a distribuição de resíduos para o modelo com difusividade efetiva variável, foi possível observar que os valores são significativamente menores do que os encontrados quando se adota o modelo de difusividade constante.

As cinéticas de hidratação das sementes de Jequitibá-branco nas temperaturas de 25 °C, 35 °C e 45 °C se adequaram à solução analítica da Lei de Fick, tendo a temperatura causado impacto positivo na taxa de absorção de água. Entretanto, os valores médios para os coeficientes de difusividade efetiva constante encontrados não representaram todas as etapas do processo de hidratação.

O modelo difusivo considerando a difusividade efetiva variável com ajustes parciais e sequenciais da solução analítica da analogia da Segunda Lei de Fick representou melhor o comportamento da cinética de hidratação para sementes de Jequitibá-branco na faixa de temperatura estudada. Além de mostrar significativas melhorias nos parâmetros de ajuste, forneceram mais informações sobre os mecanismos de hidratação física das sementes *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze, tomando vantagem dos modelos empíricos e semi-empíricos utilizados com frequência para descrever cinéticas de hidratação.

A microtomografia de raios-X indicou que o meio interno da semente não é isotrópico, sendo composto por diferentes tecidos. Entretanto, considerando que os ajustes, sobretudo os realizados para difusividade efetiva variável, apresentaram bons coeficientes, ainda que o meio não seja de fato homogêneo e isotrópico, essa consideração não promove imprecisões significativas no ajuste a ponto de inviabilizar o emprego do atual modelo. Observa-se também que em nenhum nível

de hidratação a semente sofreu qualquer injúria em seus tecidos internos, e que na faixa de temperatura estudada, o processo de hidratação não compromete a integridade dos tecidos internos.

A análise das variações da difusividade efetiva associada à análise de imagens de micro-TC se mostrou útil para a compreensão dos mecanismos físicos da hidratação juntamente com os aspectos metabólicos. A associação das técnicas também se mostrou promissora em eventuais estudos de condicionamento osmótico de sementes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. (2000), **Official methods of analysis of AOAC international**. AOAC International, Maryland.
- AHMED, M. R., YASMIN, J., COLLINS, W., & CHO, B.-K. (2018). **X-ray CT image analysis for morphology of muskmelon seed in relation to germination**. *Biosystems Engineering*, 175, 183–193. doi:10.1016/j.biosystemseng.2018
- ARMONDES, K. A. P. **CONDICIONAMENTO OSMÓTICO E DESEMPENHO DE SEMENTES DE REPOLHO COM DIFERENTES NÍVEIS DE VIGOR**. Dissertação apresentada na defesa do título de Cientista Meste. Universidade Federal de Viçosa. 2014.
- ARUN, M. N.; HEBBAR, S. S.; BHANUPRAKASH, B.; SENTHIVEL, T.; NAIR, A. K.; PADMAVATHI, G.; PANDEY, P.; SINGH, A. (2022), **Seed Priming: The Way Forward to Mitigate Abiotic Stress in Crops**. In: *Plant Stress Physiology - Perspectives in Agriculture*.
- BALBINOTI, T. C. V.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. **Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da parboilização do arroz**. XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Maringá, Paraná. 2017
- BARCELON, E. G., TOJO, S., & WATANABE, K. (1999). **Relating X-ray Absorption and Some Quality Characteristics of Mango Fruit (*Mangifera indica*L.)**. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(9), 3822–3825. doi:10.1021/jf980690e 10.1021/jf980690e
- BOVIK, A. C. (2009), Basic gray level image processins. In: *The Essential Guide to Image Processing*, Academic Press, p.43-68.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Silvicultura com Espécies Nativas e Sistemas Agroflorestais - PENSAF**. Brasília, outubro, 2006.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL. C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinold, 1992. 450p.
- CARVALHO, D. A. de; OLIVEIRA-FILHO, A. T. de; VILELA, E. de A.; CURI, N. **Florística e estrutura da vegetação arbórea de um fragmento de floresta**

- ciliar do Alto São Francisco (Martinho Campos, Minas Gerais).** Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer, Brasília, v. 6, p. 5- 22, 2000.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção.** Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588p.
- CARVALHO, P. E. R. **Jequitibá-branco.** Circular técnica 73. Embrapa, Colombo, dezembro, 2003.
- CHUDNOFF, M. (1984), Tropical timbers of the world. Agriculture Handbook, 607. Madison: USDA. Forest products Laboratory, 26p.
- CIRIELLO, Eduardo. **Planejamento de Projetos Florestais.** Tropical Flora Reflorestadora. Garça, SP. 2011.
- COLODETTE, J.L. *et al.* **The Brazilian wood biomass supply and utilization focusing on eucalypt.** Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v.1, n.25, p.1-8, 2014.
- COSTA, C. J. VILLELA, F. A. **Condicionamento osmótico de sementes de beterraba. Revista Brasileira de Sementes [online].** 2006, v. 28, n. 1 [Acessado 29 Agosto 2022] , pp. 21-29. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-31222006000100004>>. Epub 25 Out 2006. ISSN 0101-3122. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222006000100004>.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion.** Oxford University Press, 2 ed. London, 1975. 424p.
- CUBBAGE, F. *et al.* **Global timber investments, wood costs, regulation, and risk.** Biomass and bioenergy, v.34, p.1667-1678, 2010.
- CUNNINGHAM, S. E., MCMINN, W. A. M., MAGEE, T. R. A., & RICHARDSON, P. S. (2008). **Effect of processing conditions on the water absorption and texture kinetics of potato.** Journal of Food Engineering, 84(2), 214– 223. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.05.007
- DAMALAS, A. KOUTROBAS, D. & FOTIADIS. (2019). **Hydro-priming Effects on Seed Germination and Field Performance of Faba Bean in Spring Sowing.** Agriculture, 9(9), 201. doi:10.3390/agriculture9090201
- DASTANPOOR, N. ; FAHIMI, H. ; SHARIATI, M. ; DAVAZDAHEMAMI, S. ; HASHEMI, S. M. M. **Effects of hydropriming on seed germination and seedling growth in sage (*Salvia officinalis* L.).** African Journals of Biotechnology. Vol. 12 No. 11 (2013).

- DEARMAN J, BROCKLEHUST PA, DREW RLK (1987) **Effect of osmotic priming and aging on the germination and emergence of carrot and leek seed.** Ann Appl Biol 111:717–722
- DI GIROLAMO G, BARBANTI L (2012) **Treatment conditions and biochemical processes influencing seed priming effectiveness.** Italian J Agr 7:e25
- DURIGAN, G.; FIGLIOLIA, M. B.; KAWABATA, M.; GARRIDO, M. A. de O.; BAITELLO, J. B. **Sementes e mudas de árvores tropicais.** São Paulo: Páginas & Letras, 1997. 65 p.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global Forest Resources Assessment 2015.** Rome: 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>
- FAROOQ, M., BASRA, S.M.A. & AHMAD, N. **Improving the performance of transplanted rice by seed priming.** Plant Growth Regul 51, 129–137 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9155-x>
- FELIZARDO, M. P.; MERLO, G. R. F.; MAIA, G. D. (2021), Modeling drying kinetics of *Jacaranda mimosifolia* seeds with variable effective diffusivity via diffusion model. Biosystems Engineering, v. 205, p. 234-245.
- FERNANDES, P. G. **Aplicação da Microtomografia Computadorizada para a Análise Morfométrica Bi e Tridimensional na Avaliação da Perda Óssea Experimental em Ratos.** 124p. Tese de Doutorado, apresentada à Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.
- FIGLIOLIA, M. B.; SILVA, A.; AGUIAR, I. B.; PERECIN, D. **Conservação de sementes de *Cariniana estrellensis* Kuntze em diferentes condições de acondicionamento e armazenamento.** Revista Árvore, v. 24, n. 4, p. 361-368, 2000.
- FREIRE, J. F. **Tópicos em secagem de produtos naturais.** 2018
- GARCIA, E. B.; ÁVILA, M. R.; JUSSIANI, E. I.; TEJO, D. P.; GOMES-JUNIOR, F.G.; ANDRELLO, A. C. **Identificação de danos em sementes de trigo (*Triticum aestivum*) por meio de microtomografia computadorizada.** 2018.
- GARGIULO, L., LEONARDUZZI, C., & MELE, G. (2020). **Micro-CT imaging of tomato seeds: Predictive potential of 3D morphometry on germination.** Biosystems Engineering, 200, 112–122. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020
- Germaines Seed Technology. **What is seed priming?** January, 2016. Available at:

<https://germains.com/what-is-seed-priming/>

- GOMES-JUNIOR, F.G; VAZ, C.M.P.; CICERO, S.M.; JORGE, L.A.C.
Procedimentos para avaliação da estrutura de sementes de soja e milho por microtomografia computadorizada de raios X. São Carlos, 2014.
- GÓRNICKI, K.; KALETA, A.; WINICZENKO, R.; CHOJNACKA, A.; JANASZEK, M.
Some Remarks on Modelling of Mass Transfer Kinetics During Rehydration of Dried Fruits and Vegetables. Mass Transfer - Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling. In Tech, 2013
- GROTH, D. **Caracterização morfológica das unidades de dispersão e das plântulas de espécies invasoras das tribos Anthemidae, Astereae e cichorieae (Compositae).** Revista Brasileira de Botânica, v. 7, n. 3, p. 49- 94, 1985.
- HADAS, A. (2005), Germination and seedling establishment. Encyclopedia of Soils in the Environment, Elsevier, p.130-137.
- HASANUZZAMAN, M., & FOTOPOULOS, V. (Eds.). (2019). **Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings.** doi:10.1007/978-981-13-8625-1
- IBÁ – INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Relatório 2017.** São Paulo: IBÁ, 2018.
- JANKOWSKY, I. P.; GALVÃO A. P. M. **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: um guia para ações municipais e regionais.** Brasília: [s.n.], 2000.
- JESUS, R. M.; RODRIGUES, F. C. M. P. **Comportamento das sementes de *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze durante o armazenamento.** In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL, 5., 1984, Nova Prata. Anais. Nova Prata: Prefeitura Municipal de Nova Prata, 1984. v.2, p. 314-327.
- KAYMAK-ERTEKIN, F. **Drying and Rehydrating Kinetics of Green and Red Peppers.** Journal of Food Science. Vol. 67, Nr. 1, 2002
- KHAN AA (1991) **Preplant physiological seed conditioning.** Hort Rev 13:131–181
- KHAZAEI, J., & MOHAMMADI, N. (2009). **Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.).** Journal of Food Engineering, 91(4), 542-552.
- LAMB, D.; PARROTA, J.; KEENAN, R.; TUCKER, N. **Rejoining habitat remnants:**

- restoring degraded rainforest lands.** In: LAURANCE, W. F.; BJORREGAARD JUNIOR, R. O. *Tropical Forest remnants*. Chicago: The University of Chicago Press, 1997. p. 366–385.
- LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M. **Recomendações para utilizações do microtomógrafo de raios X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas.** São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 22p (Documentos, 37)
- LENHARD, D. C.; GARCIA, C. C.; CIOLIN, I. H. **Cinética de reidratação de cranberries em leite e água.** XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza, Ceará. 2016.
- LIMA JUNIOR, M. J.V. ed. **Manual de Procedimentos para Análise de Sementes Florestais.** 146p, UFAM - Manaus-Amazonas, Brasil.
- LISBÔA, J. F.; SILVA, J. N.; CAVALCANTI, M. T.; SILVA, E. M. C. A.; GONÇALVES, M. C. **Análise da hidratação de grãos de alpiste.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.19, n.3, p.218–223, 2015
- LOPES, J. C.; MATHEUS, M. T. **Caracterização morfológica de sementes, plântulas e da germinação de *Dimorphandra wilsonii* RIZZ. – faveiro-de-wilson (Fabaceae-Caesalpinioideae).** Revista Brasileira de Sementes, vol. 30, nº 1, p.96-101, 2008
- LORENZI, H. **Arvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil.** 2.ed. Nova Odessa: Plantarum, 1998. 2v. ISBN do v.2 – 8586714070
- MALDONADO, S., ARNAU, E., & BERTUZZI, M. A. (2010). **Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes.** Journal of Food Engineering, 96(3), 333- 341. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.08.017
- MANGABEIRA, J. A. de C.; ROMEIRO, A. R.; VALLADARES, G. S. **Biodiversidade, reflorestamento e agropecuária no Brasil.** Florestar Estatístico, São Paulo, v. 7, n. 16, p. 15-22, jul. 2004.
- MATSUSHIMA, K.-I., & SAKAGAMI, J.-I. (2013). **Effects of Seed Hydropriming on Germination and Seedling Vigor during Emergence of Rice under Different Soil Moisture Conditions.** American Journal of Plant Sciences, 04(08), 1584–1593. doi:10.4236/ajps.2013.48191

- MCDONALD MB (2000) **Seed priming**. In: Black M, Bewley JD (eds) Seed technology and its biological basis. Sheffield Academic Press, Sheffield, pp 287–325
- MENDES, A. V.; SAMPAIO, M. V.; GRANDO, R.; NETO, S. F. **Avaliação Ambiental de Nascentes com o uso de ferramentas de geoprocessamento**. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- MENDOZA, F., VERBOVEN, P., MEBATSION, H.K. *et al.* **Three-dimensional pore space quantification of apple tissue using X-ray computed microtomography**. *Planta* 226, 559–570 (2007).
<https://doi.org/10.1007/s00425-007-0504-4>
- MERLO, G. R.; FELIZARDO, M. P.; MAIA, G. D. **Caracterização e secagem de sementes de Jacarandá-mimoso (*Jacaranda mimosifolia*)**. Em: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP 2019. Campinas: Galoá. 2019.
- MORADI, A.; YOUNESI, O. **Effects of Osmo- and Hydro-priming on Seed Parameters of Grain Sorghum (*Sorghum bicolor L.*)**. *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, 3(3): 1696-1700, 2009
- MURUNGU FS, CHIDUZA C, NYAMUGAFATA P, CLARK LJ, WHALLEY WR, Finch-Savage WE (2004) **Effects of ‘on-farm seed priming’ on consecutive daily sowing occasions on the emergence and growth of maize in semi-arid Zimbabwe**. *Field Crops Res* 89:49–57
- NAKAGAWA, J. **Teste de vigor baseado na avaliação de plântulas**. In: Curso sobre teste de vigor em sementes, 14-17/09/1992. FCAV/ UNESP. Jaboticabal: FUNEP, 1992. p.76-95.
- NASCIMENTO, W. M. (2004), **Condicionamento osmótico de sementes de hortaliças**. Embrapa Hortaliças, Brasília. Circular técnica, 11 p.
- NAWAZ, J.; HUSSAIN, M.; JABBAR, A.; NADEEM, G. A.; SAJID, M.; SUBTAIN, M.; SHABBIR, I. **Seed Priming A Technique**. *Intl J Agri Crop Sci*. Vol., 6 (20), 1373-1381, 2013
- NIRANJAN Raj S, SHETTY NP, SHETTY HS (2004) **Seed bio-priming with *Pseudomonas fluorescens* isolates enhances growth of pearl millet plants and induces resistance against downy mildew**. *Int J Pest Manag* 50:41–48

- NOGUEIRA, A. C.; MEDEIROS, A. C. S. **Coleta de Sementes Florestais Nativas**. Circular Técnica 144. Colombo, PR: Embrapa, 2007. 11 p
- OLIVEIRA, A. K. M.; SCHLEDER, E. D.; FAVERO, S. **Caracterização morfológica, viabilidade e vigor de sementes de tabebuia aurea (silva manso) Benth. & Hook. F. ex. s. Moore**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.30, n. 1, p. 25-32, 2006
- OLIVEIRA, A. S. SILVA-MANN, R. SANTOS, M. F. GOIS, I. B. BARRETTO, M. C. V. **Condicionamento osmótico em sementes de milho doce submetidas ao armazenamento**. Rev. Ciên. Agron., Fortaleza, v.38, n.4, p. 444-448, Out.-Dez., 2007
- PAPARELLA, S., ARAÚJO, S.S., ROSSI, G. *et al.* **Seed priming: state of the art and new perspectives**. Plant Cell Rep 34, 1281–1293 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>
- PARERA C, CANTLIFFE D (1990) **Improved stand establishment of sh 2 sweet corn by solid matrix priming**. Proc Nat Symp Stand Estab Hort Crops, pp 91–96 (Minneapolis, MN)
- PAULINO, R. C. **Estudos sobre a morfometria de frutos e sementes, emergência de plântulas e crescimento inicial de mudas de mufumbo (Combretum leprosum Mart.)**. Mossoró, 2011. 83f.: il. Dissertação – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
- PEREIRA, A. LEIDERMAN, R. ALMEIDA, R. BAGUEIRA, R. **Experiências na engenharia da UFF com microtomografia de raios-X**. Escola de Engenharia, Instituto de Computação e Química, Universidade Federal Fluminense, 2016
- PILL WG, NECKER AD. 2001. **The effects of seed treatments on germination and establishment of Kentucky bluegrass (Poapratense L.)**. Seed Sci. Technol. 29: 65-72.
- RAFIQ S, IQBAL T, HAMEED A, RAFIQI ZA, RAFIQ N. 2006. **Morphobiochemical analysis of salinity stress response of wheat**. Pak. J. Bot. 38 1759- 1767.
- RAMACHANDRAN, R. P., ERKINBAEV, C., THAKUR, S., & PALIWAL, J. (2021). **Three dimensional characterization of micronized soybean seeds using X-ray microtomography**. Food and Bioproducts Processing, 127, 388–397. doi:10.1016/j.fbp.2021.03.007 10.1016/j.fbp.2021.03.007
- RECORD, S. J.; HESS, R. W. (1972), Timbers of the new worlds: use and abuse of

- America's nature resources. New York. Arno Press, 640p.
- RÊGO, CM.; POSSAMAI, E. **Recomposição florestal Cultivo do Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*)**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. 24p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Circular técnica, 25).
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. **Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão** *Acta Sci. Agron. Maringá*, v. 29, n. 3, p. 373-378, 2007
- RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P.; RANAL, M. A. **SEMENTES FLORESTAIS BRASILEIRAS: INÍCIO PRECÁRIO, PRESENTE INEBRIANTE E O FUTURO, PROMISSOR?** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 771-784, jul.-set., 2014
- ROY NK, SRIVASTAVA AK (1999) **Effect of presoaking seed treatment on germination and amylase activity of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress conditions**. *Rachis* 18:46–51
- SANTOS, J. F. L.; SANTOS, D. B.; ROSSI, A. A. B.; PENA, G. F.; TIAGO, A. V. **Caracterização biométrica de frutos e sementes de Murici (*Byrsonima crassifolia* L.) na região norte do Mato Grosso, Brasil**. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15 n.27
- SOBUKOLA, Olajide Philip; ABAYOMI, Hannah Temitayo. **Physical properties and rehydration characteristics of different varieties of maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds**. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 35, n. 3, p. 299-307, 2011.
- SOLOMON, W. K. (2007). **Hydration kinetics of lupin (*Lupinus albus*) seeds**. *Journal of Food Process Engineering*, 30(1), 119–130.
- TSENG, C. L.; ALVES, M. C.; SOUTO-FILHO, S. N.; SOUZA, E. J.; CRESTANA, S. **Microtomografia de raios-X aplicada ao estudo da qualidade física do solo**. *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*. São Carlos, 2014.
- VERMA, R. C., & PRASAD, S. (1999). **Kinetics of absorption of water by maize grains**. *Journal of Food Engineering*.
- YALDAGARD M, MORTAZAVI SA, TABATABAIE F (2008) **Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: optimization of method by the Taguchi Approach**. *J Inst Brew* 114:14–21

ANEXO 1 – Determinação da espessura das 105 sementes

N° da semente	e (mm±0,5)	N° da semente	e (mm±0,5)	N° da semente	e (mm±0,5)	N° da semente	e (mm±0,5)
1	3,65	31	3,34	61	3,75	91	4,21
2	3,62	32	3,38	62	3,91	92	3,81
3	4,21	33	3,69	63	3,30	93	3,78
4	3,80	34	3,36	64	3,58	94	3,25
5	4,01	35	3,56	65	3,53	95	4,02
6	3,20	36	4,39	66	3,38	96	3,85
7	3,32	37	3,66	67	3,65	97	3,81
8	4,14	38	3,94	68	2,86	98	3,95
9	3,94	39	4,19	69	3,69	99	3,88
10	3,47	40	3,66	70	3,68	100	4,21
11	3,30	41	3,25	71	4,08	101	3,97
12	3,97	42	4,40	72	3,44	102	4,08
13	4,11	43	3,22	73	3,75	103	3,90
14	3,39	44	3,94	74	4,15	104	3,81
15	3,91	45	3,87	75	3,88	105	3,91
16	3,57	46	3,93	76	4,45		
17	3,53	47	4,11	77	3,57		
18	3,69	48	3,74	78	3,59		
19	3,87	49	4,33	79	3,46		
20	3,73	50	3,93	80	3,98		
21	4,06	51	3,53	81	3,87		
22	3,79	52	3,64	82	3,77		
23	3,60	53	3,26	83	3,64		
24	3,28	54	4,02	84	3,25		
25	3,63	55	3,88	85	3,43		
26	3,67	56	3,86	86	4,02		
27	3,59	57	3,68	87	4,23		
28	3,68	58	3,59	88	3,96		
29	3,46	59	3,57	89	3,49		
30	4,03	60	3,86	90	3,77		

ANEXO 2 – Determinação das umidades iniciais das sementes

Temperatura: 25°C	Temperatura: 35°C	Temperatura: 45°C
Massa seca 1 (g): 1,1996	Massa seca 1 (g): 1,2864	Massa seca 1 (g): 1,0826
Massa inicial 1 (g): 1,3674	Massa inicial 1 (g): 1,4910	Massa inicial 1 (g): 1,3082
Massa de água 1 (g): 0,1678	Massa de água 1 (g): 0,2046	Massa de água 1 (g): 0,2256
Umidade inicial 1: 0,1399	Umidade inicial 1: 0,1590	Umidade inicial 1: 0,2084
Massa seca 2 (g): 1,1897	Massa seca 2 (g): 1,1988	Massa seca 2 (g): 1,2058
Massa inicial 2 (g): 1,3438	Massa inicial 2 (g): 1,3700	Massa inicial 2 (g): 1,4022
Massa de água 2 (g): 0,1541	Massa de água 2 (g): 0,1712	Massa de água 2 (g): 0,1964
Umidade inicial 2: 0,1295	Umidade inicial 2: 0,1428	Umidade inicial 2: 0,1629
Massa seca 3 (g): 1,1785	Massa seca 3 (g): 1,2614	Massa seca 3 (g): 1,3272
Massa inicial 3 (g): 1,3272	Massa inicial 3 (g): 1,4374	Massa inicial 3 (g): 1,5735
Massa de água 3 (g): 0,1487	Massa de água 3 (g): 0,1760	Massa de água 3 (g): 0,2463
Umidade inicial 3: 0,1262	Umidade inicial 3: 0,1395	Umidade inicial 3: 0,1856

ANEXO 3 – Determinação das cinéticas de umidificação

Temperatura: 25°C									
Tempo (h)	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	m_{total} (g)	$m_{água}$ (g)	X_t	m_{total} (g)	$m_{água}$ (g)	X_t	m_{total} (g)	$m_{água}$ (g)	X_t
0	1,3674	0,1678	0,1399	1,3438	0,1541	0,1295	1,3272	0,1487	0,1262
0,50	1,5347	0,3351	0,2793	1,5021	0,3124	0,2626	1,4538	0,2753	0,2336
1	1,5808	0,3812	0,3178	1,5405	0,3508	0,2949	1,4994	0,3209	0,2723
1,5	1,6034	0,4038	0,3366	1,5624	0,3727	0,3133	1,5248	0,3463	0,2938
2	1,6251	0,4255	0,3547	1,5736	0,3839	0,3227	1,5439	0,3654	0,3101
3	1,6574	0,4578	0,3816	1,6061	0,4164	0,3500	1,5773	0,3988	0,3384
4	1,6891	0,4895	0,4081	1,6278	0,4381	0,3682	1,6007	0,4222	0,3583
7	1,7694	0,5698	0,4750	1,6932	0,5035	0,4232	1,6718	0,4933	0,4186
8	1,7921	0,5925	0,4939	1,7162	0,5265	0,4425	1,6969	0,5184	0,4399
14	1,8836	0,6840	0,5702	1,7966	0,6069	0,5101	1,7896	0,6111	0,5185
15	1,9071	0,7075	0,5898	1,8143	0,6246	0,5250	1,8093	0,6308	0,5353
18,75	1,9570	0,7574	0,6314	1,8535	0,6638	0,5580	1,8435	0,6650	0,5643
22	1,9860	0,7864	0,6556	1,8841	0,6944	0,5837	1,8701	0,6916	0,5868
24,25	2,0158	0,8162	0,6804	1,9041	0,7144	0,6005	1,8987	0,7202	0,6111
26	2,0330	0,8334	0,6947	1,9162	0,7265	0,6107	1,9077	0,7292	0,6188
38,67	2,1155	0,9159	0,7635	1,9742	0,7845	0,6594	1,9694	0,7909	0,6711
42,25	2,1413	0,9417	0,7850	1,9928	0,8031	0,6750	1,9861	0,8076	0,6853
47	2,1693	0,9697	0,8084	2,0114	0,8217	0,6907	2,0032	0,8247	0,6998
64	2,2396	1,0400	0,8670	2,0531	0,8634	0,7257	2,0675	0,8890	0,7543
71	2,2705	1,0709	0,8927	2,0611	0,8714	0,7325	2,0815	0,9030	0,7662
88,25	2,3298	1,1302	0,9421	2,0821	0,8924	0,7501	2,1076	0,9291	0,7884
94,75	2,3487	1,1491	0,9579	2,0852	0,8955	0,7527	2,1137	0,9352	0,7936

Temperatura: 35°C									
Tempo (h)	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	m_{total} (g)	$m_{água}$ (g)	X_t	m_{total} (g)	$m_{água}$ (g)	X_t	m_{total} (g)	$m_{água}$ (g)	X_t
0	1,4910	0,2046	0,1590	1,3700	0,1712	0,1428	1,4374	0,1760	0,1395
0,50	1,6468	0,3604	0,2802	1,5506	0,3518	0,2935	1,5963	0,3349	0,2655
1	1,6915	0,4051	0,3149	1,5867	0,3879	0,3236	1,6464	0,3850	0,3052
1,5	1,7255	0,4391	0,3413	1,6132	0,4144	0,3457	1,6758	0,4144	0,3285
2,5	1,7674	0,4810	0,3739	1,6600	0,4612	0,3847	1,7208	0,4594	0,3642
4	1,8397	0,5533	0,4301	1,7240	0,5252	0,4381	1,7826	0,5212	0,4132
5	1,8619	0,5755	0,4474	1,7600	0,5612	0,4681	1,8221	0,5607	0,4445
7	1,9148	0,6284	0,4885	1,8093	0,6105	0,5093	1,8753	0,6139	0,4867
9	1,9600	0,6736	0,5236	1,8539	0,6551	0,5465	1,9218	0,6604	0,5235
11	2,0080	0,7216	0,5609	1,8908	0,6920	0,5772	1,9666	0,7052	0,5591
13,7	2,0336	0,7472	0,5808	1,9313	0,7325	0,6110	2,0005	0,7391	0,5859
17	2,0701	0,7837	0,6092	1,9748	0,7760	0,6473	2,0448	0,7834	0,6211
21	2,1002	0,8138	0,6326	2,0059	0,8071	0,6733	2,0742	0,8128	0,6444
23	2,1119	0,8255	0,6417	2,0199	0,8211	0,6849	2,0891	0,8277	0,6562
29	2,1533	0,8669	0,6739	2,0600	0,8612	0,7184	2,1322	0,8708	0,6903
33	2,1664	0,8800	0,6841	2,0779	0,8791	0,7333	2,1533	0,8919	0,7071
46,2	2,2064	0,9200	0,7152	2,1253	0,9265	0,7729	2,1929	0,9315	0,7385
50	2,2131	0,9267	0,7204	2,1370	0,9382	0,7826	2,2060	0,9446	0,7489
56	2,2268	0,9404	0,7310	2,1469	0,9481	0,7909	2,2197	0,9583	0,7597
72	2,2632	0,9768	0,7593	2,1941	0,9953	0,8302	2,2611	0,9997	0,7925
80	2,2798	0,9934	0,7722	2,2103	1,0115	0,8438	2,2814	1,0200	0,8086
95	2,2997	1,0133	0,7877	2,2338	1,0350	0,8634	2,3097	1,0483	0,8311
99	2,3024	1,0160	0,7898	2,2362	1,0374	0,8654	2,3110	1,0496	0,8321

Temperatura: 45°C									
Tempo (h)	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	m _{total} (g)	m _{água} (g)	X _t	m _{total} (g)	m _{água} (g)	X _t	m _{total} (g)	m _{água} (g)	X _t
0	1,3082	0,2256	0,2084	1,4022	0,1964	0,1629	1,5935	0,2663	0,2006
0,50	1,4868	0,4042	0,3734	1,5962	0,3904	0,3238	1,7832	0,4560	0,3436
1	1,5285	0,4459	0,4119	1,6382	0,4324	0,3586	1,8264	0,4992	0,3761
1,5	1,5681	0,4855	0,4485	1,6767	0,4709	0,3905	1,8574	0,5302	0,3995
2,5	1,6157	0,5331	0,4924	1,7235	0,5177	0,4293	1,9127	0,5855	0,4412
4	1,6856	0,6030	0,5570	1,7879	0,5821	0,4828	1,9743	0,6471	0,4876
5	1,7164	0,6338	0,5854	1,8230	0,6172	0,5119	2,0101	0,6829	0,5145
7	1,7740	0,6914	0,6386	1,8838	0,6780	0,5623	2,0765	0,7493	0,5646
9	1,8137	0,7311	0,6753	1,9229	0,7171	0,5947	2,1208	0,7936	0,5980
11	1,8466	0,7640	0,7057	1,9571	0,7513	0,6231	2,1516	0,8244	0,6212
13,7	1,8794	0,7968	0,7360	1,9834	0,7776	0,6449	2,1852	0,8580	0,6465
17	1,9139	0,8313	0,7679	2,0165	0,8107	0,6723	2,2202	0,8930	0,6728
21	1,9552	0,8726	0,8060	2,0538	0,8480	0,7033	2,2651	0,9379	0,7067
23	1,9708	0,8882	0,8204	2,0666	0,8608	0,7139	2,2821	0,9549	0,7195
29	2,0271	0,9445	0,8724	2,1149	0,9091	0,7539	2,3335	1,0063	0,7582
33	2,0610	0,9784	0,9038	2,1387	0,9329	0,7737	2,3597	1,0325	0,7780
47,2	2,1520	1,0694	0,9878	2,1732	0,9674	0,8023	2,4208	1,0936	0,8240
50	2,1700	1,0874	1,0044	2,1837	0,9779	0,8110	2,4306	1,1034	0,8314
57	2,1914	1,1088	1,0242	2,1948	0,9890	0,8202	2,4367	1,1095	0,8360
70,2	2,2287	1,1461	1,0587	2,2191	1,0133	0,8404	2,4382	1,1110	0,8371
78,2	2,2305	1,1479	1,0603	2,2197	1,0139	0,8409	2,4337	1,1065	0,8337