

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SEMENTES DE FEIJÃO-
CAUPI DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM**

GUILHERME CARDOSO OBA

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016**

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SEMENTES DE FEIJÃO- CAUPI DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM

GUILHERME CARDOSO OBA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

O12c Oba, Guilherme Cardoso

Caracterização física de sementes de feijão-caupi durante o processo de secagem / Guilherme Cardoso Oba -- Dourados: UFGD, 2016.

88f. : il. ; 30 cm.

Orientador: André Luís Duarte Goneli

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Vigna unguiculata (L.) Walp.. 2. Propriedades físicas. 3. Contração volumétrica. 4. Cinética de secagem. 5. Propriedades termodinâmicas. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

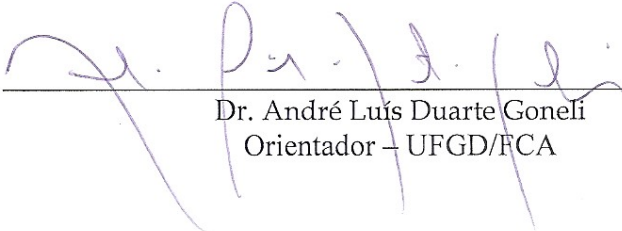
**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SEMENTES DE FEIJÃO-CAUPI DURANTE O
PROCESSO DE SECAGEM**

por

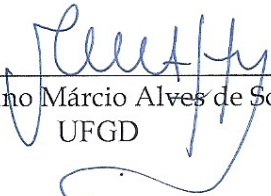
GUILHERME CARDOSO OBA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

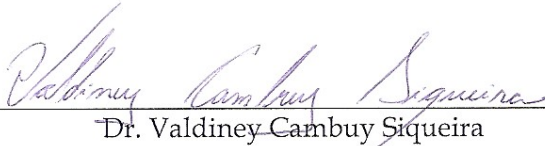
Aprovada em: 24/03/2016



Dr. André Luís Duarte Goneli
Orientador – UFGD/FCA



Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza
UFGD



Dr. Valdiney Cambuy Siqueira
UFGD

Dedico

Aos meus pais, Delson Oba e Cleide dos Santos Cardoso, e irmãos, Felipe Cardoso Oba e Iasmin Sayuri Cardoso Oba, que são à base de minha existência.

A todos os meus amigos e familiares, pelo apoio, compreensão e momentos de alegria.

À minha namorada, Larissa Pippus, pela parceria, carinho e, principalmente, por completar-me.

Ofereço

Ao grandioso e bondoso Deus, por todas as conquistas a mim concedidas e, principalmente, por nunca desamparar-me nos momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Ao grandioso e generoso Deus, por permitir a mim, executar este trabalho.

À Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade e auxílio concedido.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo auxílio financeiro durante o período de mestrado.

Ao Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli, pela amizade, paciência e orientação durante esses dois anos.

A todos os professores da Faculdade de Ciências Agrárias, pela amizade e por compartilharem seus conhecimentos.

Aos colegas de pós-graduação, Prof. M. Sc. Elton Aparecido Siqueira Martins, Cesar Pedro Hartmann Filho, Laira Rodrigues Ferreira, Vinicius Souza Patricio, Sara Maria Mongelós Barrios, Luana do Nascimento Silveira Dorneles, Viviane Neves da Silva e Thalita Martinhão de Souza Azambuja, pelo apoio durante a condução deste trabalho.

Aos colegas de graduação, Alexandre Alves Gonçalves, Renato Tertuliano Garcia, Lidiane Dausacker Gomes, Crislayne Cândido dos Santos, Eduardo Alves Gonçalves e Fernando Campos de Araújo, pela ajuda durante todo o experimento.

Aos funcionários da Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, pelo auxílio nas etapas de implantação e condução da cultura no campo.

Aos professores, membros das bancas de Qualificação e de Defesa, Dr. Valdiney Cambuy Siqueira, Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza, Dr. Munir Mauad e Dra. Vanderleia Schoeninger, pelas valiosas contribuições para o presente estudo.

Por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
CAPÍTULO 1.....	10
PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO-CAUPI DURANTE A SECAGEM	10
1.1. INTRODUÇÃO	10
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	14
1.2.1. Massa específica aparente e massa específica real ou unitária	15
1.2.2. Porosidade da massa	17
1.2.3. Massa de mil sementes.....	17
1.2.4. Dimensões características	17
1.2.5. Forma e tamanho.....	18
1.2.6. Índice de contração volumétrica da massa e unitária.....	20
1.2.7. Procedimento estatístico.....	21
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
1.4. CONCLUSÕES	41
1.5. REFERÊNCIAS.....	42
CAPÍTULO 2.....	47
CINÉTICA DE SECAGEM DE SEMENTES DE FEIJÃO-CAUPI EM CAMADA DELGADA	47
2.1. INTRODUÇÃO	47
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	51
2.2.1. Determinação da razão de umidade e taxa de redução de água	54
2.2.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo	56
2.2.3. Influência da temperatura.....	57
2.2.4. Propriedades termodinâmicas	57
2.2.5. Procedimento estatístico.....	58
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60

2.3.1. Razão de umidade e taxa de redução de água	60
2.3.2. Coeficiente de difusão efetivo.....	71
2.3.3. Influência da temperatura.....	73
3.3.4. Propriedades termodinâmicas	77
2.4. CONCLUSÕES	81
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
CONCLUSÕES GERAIS.....	88

OBA, Guilherme Cardoso. **Caracterização física de sementes de feijão-caupi durante o processo de secagem**. 88 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS. Orientador: André Luís Duarte Goneli.

RESUMO

As informações obtidas com a determinação das propriedades físicas e das curvas de secagem em camada delgada são importantes para estudos de transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares, dimensionamento de silos, projeto e melhoria de equipamentos pós-colheita e para análise de viabilidade comercial de sistemas de secagem. Neste sentido, objetivou-se com o presente estudo avaliar a variação do teor de água e das características físicas de sementes de feijão-caupi durante o processo de secagem. O trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, no segundo semestre de 2015. Foram utilizadas sementes de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, colhidas com um teor de água de, aproximadamente, 0,47 decimal base seca (b.s.). Para a análise das propriedades físicas, as sementes foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a uma temperatura de 40°C, até atingirem o teor de água de, aproximadamente, 0,11 decimal b.s. Durante a redução do teor de água do material, avaliaram-se a massa específica aparente e real, porosidade, massa de mil sementes, dimensões características, volume unitário, circularidade, esfericidade, área projetada e superficial, relação superfície/volume e relação superfície/massa, bem como a contração volumétrica da massa e unitária do produto. O estudo da cinética de secagem foi realizado em secador experimental de leito fixo, empregando-se a combinação entre cinco temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80°C) e três velocidades do ar de secagem (0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹). O produto foi seco até atingir teor de água de, aproximadamente, 0,103 decimal b.s. Aos dados experimentais de razão de umidade, foram ajustados modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para a representação da secagem de produtos agrícolas. Foram também determinadas a taxa de redução de água, o coeficiente de difusão efetivo, a energia de ativação e as principais propriedades termodinâmicas relacionadas ao processo de secagem. Os resultados obtidos permitiram concluir que: todas as propriedades físicas das sementes de feijão-caupi são influenciadas pela redução do teor de água; dentre outros, o modelo de Page representa satisfatoriamente as curvas de secagem do produto, as quais são mais influenciadas pela temperatura que pela velocidade do ar de secagem; a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem resulta no aumento da taxa de redução de água do produto e nos valores do coeficiente de difusão efetivo; o aumento da velocidade do ar de secagem promove elevação das magnitudes da energia de ativação. As propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, são influenciadas pela variação da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata* (L.) Walp., propriedades físicas, contração volumétrica, cinética de secagem, propriedades termodinâmicas.

ABSTRACT

Information obtained through determined physical properties and drying curves in thin layer are important for studies of mass and heat transference and of air moving in grain masses, silos measurement, post-harvest equipments project and improvement, as well as for analyzing commercial viability of drying systems. In this sense, the aim of the present study was to determine the variation of moisture content and physical characteristics of cowpea seeds during drying process. The study was conducted at the Laboratory of Pre-Processing and Agricultural Products Storage, belonging to the Faculty of Agricultural Sciences, Federal University of Grande Dourados, Dourados-MS, the second half of 2015. Cowpea seeds, BRS Guariba cultivar, harvested with a moisture content of, approximately, 0.47 decimal d.b. (dry basis), were used. For the analysis of physical properties, seeds were submitted to drying in a stove with forced air circulation, at a temperature of 40°C, until reach moisture content of, about, 0.11 decimal d.b. During moisture content reduction of product, bulk and true density, porosity, thousand-seed weight, characteristic dimensions, geometric diameter, unitary volume, circularity, sphericity, surface and projected area, surface/volume ratio and surface/mass ratio, as well as volumetric shrinkage of mass and unitary were evaluated. The study of drying kinetics was realized in an experimental drier of fixed-bed, using the combination among five temperatures (40, 50, 60, 70 and 80°C) and three drying air velocities (0.4, 1.0 and 1.6 m s⁻¹). The product was dried until reach moisture content of, approximately, 0,103 decimal d.b. Mathematical models traditionally used to represent drying of agricultural products were adjusted to experimental data of moisture ratio. Also, water reduction rate, effective diffusion coefficient, activation energy and main thermodynamic properties were determined. Results obtained allow concluding that all physical properties of cowpea seeds are influenced by its moisture content reduction. Also, it concluded that, among others, the Page model satisfactorily represents the drying curves of cowpea seeds, which are more influenced by temperature than drying air velocity. Elevation of temperature and drying air velocity results in increased of the water reduction rate and in the values of effective diffusion coefficient. Drying air velocity elevation promotes increases in the magnitudes of activation energy. Thermodynamic properties, enthalpy and entropy specific and Gibbs free energy are influenced by variations of temperature and drying air velocity.

Keywords: *Vigna unguiculata* (L.) Walp., physical properties, volumetric shrinkage, drying kinetics, thermodynamic properties.

INTRODUÇÃO GERAL

As leguminosas estão entre os principais constituintes da alimentação humana, por fornecerem elevadas quantidades de proteínas e carboidratos. Possuem ainda valores consideráveis de tiamina e ácido ascórbico, além de minerais de relevância nutricional, como o cálcio e ferro (SILVA et al., 2002; THEERTHA et al., 2014). Dentre essas leguminosas, o feijão é uma espécie amplamente cultivada em países de climas tropical e subtropical, sobre tudo no Brasil, assumindo grande importância na alimentação humana devido aos elevados teores de proteína contidos em seus grãos e, principalmente, por seu baixo custo quando comparado às fontes de proteína animal (ALMEIDA et al., 2009; RESENDE et al., 2010).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma espécie de origem africana, sendo que, sua introdução no Brasil ocorreu em meados do século XVI por colonizadores portugueses no Estado da Bahia (FREIRE FILHO et al., 2011). Essa cultura apresenta ampla adaptação, tendo significativa importância socioeconômica para populações das Regiões Norte e Nordeste do Brasil, como suprimento alimentar, na fixação de mão-de-obra no campo e como componente essencial de sistemas de produção agrícola nessas regiões (SILVA et al., 2002; BEZERRA et al., 2008; ROCHA et al., 2011). Segundo dados da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), acerca de 68% da produção mundial de feijão-caupi é de responsabilidade do Continente Africano, enquanto que o Brasil corresponde a 17% da produção dessa leguminosa (GÓMEZ, 2004).

Grãos de feijão-caupi apresentam consideráveis teores de proteína, carboidratos, cinzas, ferro e zinco, variando na ordem de 20 a 30%, 56 a 75%, 3 a 4%, 59 a 68 mg kg⁻¹ e 41 a 44 mg kg⁻¹, respectivamente, além de baixos teores de lipídeos totais, 0,5 a 3%, conforme o genótipo (SILVA et al., 2002; FROTA et al., 2008; ROCHA et al., 2011). Contudo, Silva et al. (2002) afirmaram que, fatores como a manipulação genética, tratamentos culturais, manejo pós-colheita, métodos de processamento e tempo pós-colheita dos grãos podem alterar a proporção relativa desses constituintes químicos no produto. Segundo Davies e Zibokere (2011) e Rocha et al. (2011), grãos de feijão-caupi são comumente utilizados como ingredientes para o preparo de pudins,

bolos e sopas ou serem consumidos cozidos ou fritos, enquanto pequenas quantidades são processadas por indústrias alimentícias.

Devido à importância dessa cultura, nas últimas décadas, diversas pesquisas têm sido voltadas ao seu melhoramento genético, visando à seleção e obtenção de cultivares que melhor se adaptem às diferentes condições edafoclimáticas do Brasil (MACHADO et al., 2008; BARROS et al., 2013). Assim como para a avaliação de arranjos produtivos, como o consórcio entre a mandioca ou mamona e o feijão-caupi, que são de importância para pequenos e médios agricultores (MELO et al., 2003; SAGRILO et al., 2003).

No Brasil, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), para a safra 15/16, a maior produção de feijão-caupi, bem como a maior área cultivada, encontrou-se nas Regiões Norte-Nordeste, produzindo acerca de 152,9 mil toneladas de grãos em uma área de, aproximadamente, 408,5 mil hectares (CONAB, 2016). A Região Nordeste destacou-se no cenário nacional, sendo responsável por quase 97% da produção total de grãos de feijão-caupi. Todavia, a média de produtividade dessa cultura alcançada nessa Região foi de, apenas, 372 kg ha⁻¹, em comparação aos 1362 kg ha⁻¹ obtidos nas Regiões Centro-Sul. A Região Centro-Oeste foi responsável por, somente, 2,8% da produção nacional de feijão-caupi na safra 15/16, sendo do Estado de Goiás, uma grande fatia dessa produção.

Analisando os dados fornecidos pela CONAB (2016), fica clara a diferença de tecnologia aplicada para a produção dessa cultura nas diferentes Regiões do país, embora outros fatores, como as condições edafo-climáticas, também possam ser responsáveis por essa larga diferença de produtividade. Apesar do Estado de Mato Grosso do Sul estar entre os principais estados produtores de grãos no país, sobretudo de soja e milho, as produções relativas ao feijão-caupi não são expressivas.

Uma das possíveis opções de melhoria de produtividade do feijão-caupi, bem como para o seu estabelecimento em estados que não têm tradição em seu cultivo, seria a utilização de sementes de boa qualidade. Dependendo do manejo pós-colheita, ao quais as sementes de feijão-caupi serão submetidas, poderá contribuir ou desfavorecer a preservação da qualidade desses materiais. De acordo com Camicia et al. (2015), informações sobre o comportamento das sementes de feijão-caupi na pós-colheita, com destaque para a secagem e o armazenamento, são fundamentais para sua comercialização.

A qualidade final de um lote de sementes é resultado de uma série de fatores envolvidos na condução a campo, durante a colheita e na pós-colheita, sendo que o potencial de armazenamento do mesmo está intimamente relacionado à sua qualidade inicial (CARVALHO e NAKAGAWA, 2012; PESKE et al., 2012). Em teoria, o momento mais adequado para a colheita e o armazenamento desse produto agrícola seria quando o mesmo atingisse o ponto de maturidade fisiológica, caracterizado pelo máximo acúmulo de matéria seca e potencial fisiológico (LABBÉ e VILLELA, 2012; MARCOS-FILHO, 2015).

Desse modo, em um sistema agrícola onde a busca pela excelência se torna cada vez mais exigida, dentre outras vantagens, a colheita antecipada permitiria a minimização das perdas ocorridas no campo, em decorrência do ataque de insetos e microorganismos (RIBEIRO et al., 2005; ARAUJO et al., 2014). Entretanto, é sabido que, nesse ponto, os teores de água apresentados pelas sementes são demasiadamente elevados, 30 a 50% conforme a espécie, impossibilitando o armazenamento seguro (LABBÉ e VILLELA, 2012; MARCOS-FILHO, 2015), além da possibilidade de danificação mecânica durante a colheita.

Sementes com elevado grau de umidade apresentam atividade respiratória e demais processos metabólicos acelerados, desse modo, há o consumo antecipado de tecidos de reserva, contribuindo para o avanço da deterioração do produto (FARIA et al., 2014; ULLMANN et al., 2015). Assim, quando armazenadas com elevados teores de água, tendem a apresentar perda de qualidade, seja fisiológica, física, química ou bioquímica, mais acentuada que quando armazenadas com grau de umidade seguro (ALENCAR et al., 2010; COSTA et al., 2010; FREITAS, et al., 2011; SANTOS et al., 2012; ALI et al., 2014; SMANIOTTO et al., 2014; TIECKER JUNIOR, et al., 2014).

Neste sentido, a secagem pode ser considerada como a etapa pós-colheita mais importante para a preservação da qualidade e estabilidade desses materiais biológicos (RIBEIRO et al., 2005; CORRÊA et al., 2007; RESENDE et al., 2008 e 2010; CORRÊA et al., 2011; ARAUJO et al., 2014), desde o momento de sua colheita até a semeadura, consumo *in natura* ou sua utilização como matéria-prima para indústrias alimentícias ou bioenergéticas.

Além de tornar possível a colheita antecipada, a redução do teor de água do produto até níveis seguros resulta no decréscimo de sua atividade metabólica e, consequentes, mudanças físico-químicas durante o armazenamento, além de reduzir a atividade de microorganismos presentes na massa (CORRÊA et al., 2007; RESENDE et

al., 2008; ELIAS et al., 2009; RESENDE et al., 2010; ULLMANN et al., 2010; CORRÊA et al., 2011; GONELI et al., 2011; ARAUJO, et al., 2014).

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa, onde o ar de secagem fornece energia na forma de calor aos produtos a serem secados e esses fornecem a massa na forma de vapor de água ao ar de secagem (HALL, 1980). Resende et al. (2008) e Almeida et al. (2009) afirmaram que, durante esse complexo processo, podem ocorrer alterações significativas na qualidade e propriedades físicas do produto, conforme o método e condições de secagem empregadas.

Conforme relatado por vários pesquisadores da área em questão, a correta determinação da variação das propriedades físicas de sementes, grãos e frutos, respeitando-se a singularidade de cada produto, tem por finalidade fornecer informações que auxiliarão no seu processamento pós-colheita. Além disso, servirão para ampliar bancos de dados disponíveis a engenheiros e projetistas para o desenvolvimento e melhoria de estruturas e equipamentos destinados às operações de colheita, manuseio, classificação, transporte, beneficiamento, secagem, armazenamento, processos de controle, bem como para a otimização de processos industriais (GONELI et al., 2008; PAYMAN et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012; ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Em adição, Goneli et al. (2008) e Araujo et al. (2014) afirmaram que a caracterização completa do comportamento das propriedades físicas desses produtos agrícolas durante a secagem é uma importante ferramenta para a minimização dos custos de produção, desse modo, tornando agricultura cada vez mais competitiva e sustentável.

Para o projeto, modernização, melhoria e estudos de viabilidade comercial de sistemas para secagem de sementes e grãos, a simulação e a obtenção de informações teóricas relativas ao comportamento desses produtos agrícolas durante a secagem são essenciais (ALMEIDA et al., 2009; MENEGHETTI et al., 2012; RESENDE et al., 2010). Para Gely e Giner (2007), na verdade, são essas informações que auxiliam na tomada de decisões nessa etapa, buscando a máxima eficiência do processo e, principalmente, sem afetar a qualidade do produto a ser secado.

Conforme Afonso Júnior e Corrêa (1999), essas simulações baseiam-se na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utilizando-se um modelo matemático que possa descrever com fidelidade a perda de água do material durante a secagem. A equação obtida para a cinética de dessorção em camada delgada, associada

com equações de outras propriedades físicas do produto em questão, fornece um conjunto de relações matemáticas que contribuem para o cálculo e entendimento do processo de secagem em camada espessa (GONELI et al., 2009).

Durante o processo de secagem, tanto o comportamento das propriedades físicas quanto o das curvas de secagem de produtos agrícolas podem variar conforme a espécie ou genótipo estudado, teores de água iniciais, métodos e condições de secagem, além de fatores que antecedem a pós-colheita. Assim, o estudo do processo de secagem e das alterações físicas ocorridas em sementes de feijão-caupi durante essa operação, mediante o estudo da cinética de secagem e das propriedades físicas, poderá contribuir para a otimização da etapa pós-colheita dessa cultura.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo realizar a caracterização física e da variação do teor de água de sementes de feijão-caupi durante o processo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR; P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.
- ALENCAR, E.R.; FARONI, L.R.D.; PETERNELLI, L.A.; SILVA, M.T.C.; COSTA, A.R. Influence of soybean storage conditions on crude oil quality. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.3, p.303-308, 2010.
- ALI, M.R.; RAHMAN, M.M.; AHAMMAD, K.U. Effect of relative humidity, initial seed moisture content and storage container on soybean (*Glycine max L. Meril.*) seed quality. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, Gazipur, v.39, n.3, p.461-469, 2014.
- ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.2, n.1, p.72-83, 2009.
- ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; ORLANDO, R.C.; MARTINS, E.A.S.; HARTMANN FILHO, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.4, p.170-180, 2015.
- ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.3, p.279-286, 2014.
- BARROS, M.A.; ROCHA, M.M.; GOMES, R.L.F.; SILVA, K.J.D.; NEVES, A.C. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.4, p.403-410, 2013.
- BEZERRA, A.A.C.; TÁVORA, F.J.A.F.; FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q. Morfologia e produção de grãos em linhagens modernas de feijão-caupi submetidas a diferentes densidades populacionais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão, v.8, p.85-93, 2008.
- CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.3, p.206-214, 2015.
- CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. FUNEP: Jaboticabal, 5 ed., 2012. 590p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Quarto levantamento - safra 2015/2016. **Acompanhamento da Safra Brasileira. Grãos**, Brasília, v.4, p.1-154, janeiro 2016.

- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GARIN, S.A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G.H.H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.4, p.716-726, 2011.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- COSTA, A.R.; FARONI, L.R.D.; ALENCAR, E.R.; CARVALHO, M.C.S.; FERREIRA, L.G. Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.41, n.2, p.200-207, 2010.
- DAVIES, R.M.; ZIBOKERE, D.S. Effects of moisture content on some physical and mechanical properties of three varieties of cowpea (*vigna unguiculata* (L)walp). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, Beijing, v.13, n.1, p.1-8, 2011.
- ELIAS, M.C.; LOPES, V.; GUTKOSKI, L.C.; OLIVEIRA, M.; MAZZUTTI, M.; DIAS, A.R.G. Umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo (cv. 'Embrapa 16'). **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39 n.1, p.25-30, 2009.
- FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; CUNHA, D.A.; HONORATO, J.M.; DEVILLA, I.A. Qualidade fisiológica de sementes de crambe submetidas à secagem. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.45, n.3, p.453-460, 2014.
- FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; ROCHA, M.M.; SILVA, K.J.D.; NOGUEIRA, M.S.R.; RODRIGUES, E.V. **Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Embrapa Meio-Norte: Teresina, 2011. 84p.
- FREITAS, R.S.; FARONI, L.R.D.; SOUSA, A.H.; CECON, P.R.; CARVAL, M.S. Quality of beans stored under hermetic conditions. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1136-1149, 2011.
- FROTA, K.M.G.; SOARES, R.A.M.; ARÊAS, J.A.G. Composição química do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), cultivar BRS-Milênio. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.28, n.2, p.470-476, 2008.
- GELY, M.C.; GINER, S.A. Diffusion coefficient relationships during drying of soya bean cultivars. **Biosystems Engineering**, London, v.96, n.2, p.213-222, 2007.
- GÓMEZ, C. **Cowpea: post-harvest operations**. FAO: Rome, Post-harvest Compendium, 2004. 71p.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa - Especial Café, n.11, p.64-73, 2009.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, E.S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.33, n.2, p.148-155, 2008.

- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, n.1, p.1-8, 2011.
- HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980.
- LABBÉ, L.M.B.; VILLELA, F.A. Armazenamento de sementes. In: PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3. ed. Pelotas: Universitária/UFPel, 2012. Cap. 7, p.481-527.
- MACHADO, C.F.; TEIXEIRA, N.J.P.; FREIRE FILHO, F.R.; ROCHA, M.M.; GOMES, R.L.F. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.39, n.1, p.114-123, 2008.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2.ed., Londrina: ABRATES, 2015. 660p.
- MELO, F.B.; BELTRÃO, N.E.M.; SILVA, P.H.S. **Cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.) consorciada com feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) no Semi-Árido**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. 89p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 74).
- MENEGHETTI, V.L.; AOSANI, E.; ROCHA, J.C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C.; POHNDORI, R.S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.10, p.1115-1120, 2012.
- PAYMAN, S.H.; AJDADI, F.R.; BAGHERI, I.; ALIZADEH, M.R. Effect of moisture content on some engineering properties of peanut varieties. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, v.9, n.3 e 4, p.326-331, 2011.
- PESKE, S.T.; BARROS, A.C.S.A.; SCHUCH, L.O.B. Produção de sementes. In: PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3. ed. Pelotas: Universitária/UFPel, 2012. Cap. 1, p. 13-100.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, D.P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.
- RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RODRIGUES, D.H.; GONELI, A.L.D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n.3, p.611-617, 2005.
- ROCHA, M.M.; SILVA, K.J.D.; FREIRE FILHO, F.R.; FRANCO, L.J.D.; NUTTI, M.R.; CARVALHO, J.L.V. **Avaliação dos teores de ferro, zinco e proteína em linhagens de feijão-caupi da classe comercial branca, subclasse fradinho**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011. 4p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 226).

- SAGRILO, E.; AZEVEDO, J.N.; SOUSA, V.F.; RAMOS, G.M.; BARBOSA, F.J.V.; ARAÚJO, R.O.C.; SANTOS, J.A.; ARAÚJO, F.S. **Consórcio de mandioca + feijão-caupi adaptado à agricultura familiar**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. 19p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 47).
- SANTOS, S.B.; MARTINS, M.A.; FARONI, L.R.D.; BRITO JUNIOR, V.R. Perda de matéria seca em grãos de milho armazenados em bolsas herméticas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, n.4, p.674-682, 2012.
- SILVA, S.M.S.; MAIA, J.M.; ARAÚJO, Z.B.; FREIRE FILHO, F.R. **Composição Química de 45 Genótipos de Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002. 2p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 149).
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas das sementes de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, suplemento 1, p.2705-2714, 2012.
- SMANIOTTO, T.A.S.; RESENDE, O.; MARÇAL, K.A.F.; OLIVEIRA, D.E.C.; SIMON, G.A. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.4, p.446-453, 2014.
- THEERTHA, D.P.; SUJEETHA, J.A.R.P.; ABIRAMI, C.V.K.; ALAGUSUNDARAM, K. Effect of moisture content on physical and gravimetric properties of black gram (*Vigna mungo* L.). **International Journal of Advancements in Research & Technology**, v.3, n.3, p.97-104, 2014.
- TIECKER JUNIOR, A.; GUIMARÃES, L.E.; FERRARI FILHO, E.; CASTRO, B.; DEL PONTE, E.M.; DIONELLO, R.G. Qualidade físico-química de grãos de milho armazenados com diferentes umidades em ambientes hermético e não hermético. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.13, n.2, p.174-186, 2014.
- ULLMANN, R.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; OLIVEIRA, D.E.C.; COSTA, L.M. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.1, p.64-69, 2015.
- ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J.F.; CHAVES, T.H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.3, p.442-447, 2010.

CAPÍTULO 1

PROPRIEDADES FÍSICAS DE SEMENTES DE FEIJÃO-CAUPI DURANTE A SECAGEM

1.1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi ou feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), espécie de origem africana, é uma cultura de ampla adaptação, sendo cultivado em diversas regiões do Brasil, sobretudo nas Regiões Norte e Nordeste (SILVA et al., 2002; BEZERRA et al., 2008; ROCHA et al., 2009). Nas últimas décadas, no Brasil, essa cultura tem recebido especial atenção por parte de melhoristas e fitotecnistas, os quais têm buscado a obtenção de novas cultivares, bem como a avaliação do seu potencial de cultivo em sistemas de consórcio (MELO et al., 2003; SAGRILO et al., 2003; MACHADO et al., 2008; BARROS et al., 2013). Entretanto, informações a respeito do manejo pós-colheita de sementes do feijão-caupi são escassas na literatura, mormente, às relacionadas ao processo de secagem das mesmas.

A secagem é uma importante ferramenta para a conservação de sementes em longo prazo, estando entre as principais etapas pós-colheita de produtos agrícolas em geral. A redução do teor de água desses materiais até níveis seguros, por esse processo, resulta no decréscimo da atividade de microorganismos e insetos presentes na massa do produto e, principalmente, reduz a atividade metabólica do mesmo, conseqüentemente, minimizando mudanças físico-químicas do material durante o armazenamento. Além disso, a secagem possibilita a colheita antecipada dos mesmos, minimizando a ocorrência de danos causados por microorganismos, insetos e variações de condições ambientais do campo (RIBEIRO et al., 2005; CORRÊA et al., 2007 e 2011; RESENDE et al., 2008a e 2010; GONELI et al., 2008 e 2011; ARAUJO et al., 2014).

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa, onde o ar de secagem fornece energia na forma de calor aos produtos a serem secados e esses fornecem a massa na forma de vapor de água ao ar de secagem (HALL, 1980). Resende et al. (2008a e 2008b) e Almeida et al. (2009) citaram que,

durante esse complexo processo, podem ocorrer alterações significativas na qualidade e propriedades físicas do produto, conforme o método e condições de secagem empregadas.

Para Corrêa et al. (2011), essas modificações ocorridas nas propriedades físicas de produtos biológicos, durante o processo de secagem artificial, se devem às alterações de suas estruturas celulares, por consequência do decréscimo da turgidez celular. Vale salientar que para cada espécie ou genótipo estudado, há um comportamento único durante o processo de secagem, por consequência de suas particularidades físicas e químicas (SIQUEIRA et al., 2012b; ARAUJO et al., 2014). Além disso, fatores como o manejo adotado durante os períodos de pré e/ou pós-colheita e a temperatura do ar empregada no processo de secagem também podem interferir na variação das propriedades físicas do produto (SIQUEIRA et al., 2012a, 2012b, 2012c e 2012d).

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores da área de pós-colheita têm buscado caracterizar o comportamento das propriedades físicas de sementes, grãos e frutos de diversas espécies agrícolas durante o processo de secagem (RIBEIRO et al., 2005; CORRÊA et al., 2006c e 2011; RESENDE et al., 2005 e 2008b; GONELI et al., 2008 e 2011; SIQUEIRA et al., 2012a, 2012b, 2012c e 2012d; OLIVEIRA et al., 2013 e 2014; ARAUJO et al., 2014 e 2015). Esses estudos, normalmente, fornecem informações a respeito da massa específica aparente e unitária, porosidade intergranular, massa de mil sementes, forma, tamanho e alterações volumétricas ocorridas nesses produtos agrícolas mediante o processo de secagem.

Segundo Goneli et al. (2008 e 2011), parâmetros como a massa específica aparente e unitária, porosidade, volume e o teor de água são de importância para estudos de transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares, além de determinar as condições de secagem e estocagem de produtos agrícolas. Além disso, são de importância para o dimensionamento de silos, cálculo de transportadores, separadores e classificadores de sementes e grãos, bem como para prever perdas de qualidade do material durante o armazenamento (GONELI et al., 2008; ARAUJO et al., 2014). A massa específica aparente também é conhecida como peso hectolítrico, sendo de importância para a comercialização de produtos como trigo (CORRÊA et al., 2006c), uma vez que essa característica está relacionada com o rendimento da farinha.

A forma de um determinado produto agrícola pode ser caracterizada pela sua circularidade e esfericidade. Já o seu tamanho é, comumente, representado por

características como volume, diâmetro geométrico, área projetada, área superficial e relações entre superfície e volume e entre superfície e massa. São essas informações que determinam a forma e o tamanho de furos de peneiras utilizadas para o beneficiamento de sementes e grãos. Além disso, as mesmas dão idéia da resistência à passagem de ar pela massa do produto, da dissipação de calor em sua superfície, bem como no auxílio em estudos de transferência de calor e massa e no projeto de equipamentos para secagem de produtos agrícolas (GONELI et al., 2008; ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Para Goneli et al. (2011) e Araujo et al., (2014), durante o processo de secagem, o volume externo dos produtos agrícolas é a característica que mais sofre variação, resultando, em muitos casos, na redução do seu tamanho e/ou na alteração de sua forma geométrica. A redução do tamanho do tecido celular e, conseqüente, redução do volume externo de produtos agrícolas durante o processo de secagem é chamado de contração volumétrica (RAMOS et al., 2003).

De acordo com Siqueira et al. (2012a) e Oliveira et al. (2014), o índice de contração volumétrica baseia-se na relação entre o volume unitário ou da massa de determinado produto em cada teor de água obtido durante a dessorção e seu volume inicial. Essa característica é de grande importância durante o processo de secagem de sementes, grãos e frutos, pois através dela é possível prever o quanto o volume ocupado por determinado material reduz durante o processo de dessorção (SIQUEIRA et al., 2012a).

A taxa de contração volumétrica de produtos agrícolas tende a ser reduzida à medida que se avança o processo de dessorção, sendo que a velocidade com que esse fenômeno ocorre pode variar conforme a temperatura empregada na secagem (CORRÊA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2013). Ressalta-se que o índice de contração volumétrica, propriamente dito, pode variar ou não conforme o emprego de temperaturas distintas na secagem (CORRÊA et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012a; OLIVEIRA et al., 2013 e 2014).

Segundo Brooker et al. (1992), os modelos matemáticos utilizados para representar a cinética de secagem de produtos agrícolas têm sido desenvolvidos, na maioria das vezes, negligenciando a contração volumétrica do material durante o processo de dessorção. Para Ramos et al. (2003) e Corrêa et al. (2006b), essa característica afeta parâmetros de transferência de calor e massa durante o processo de secagem, logo, deveria se incluída nesses modelos matemáticos.

Conforme Towner (1987), as bases teóricas para o entendimento do processo de contração volumétrica envolvem complexas leis de mecânica e de deformação de materiais. Todavia, diversos pesquisadores têm utilizado aproximações com modelos empíricos para facilitar a representação desse complexo fenômeno ocorrido em produtos agrícolas (GONELI et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012a; CORRÊA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2014).

Dentre os principais modelos empíricos utilizados para representar a contração volumétrica de produtos agrícolas durante sua dessecagem, destacam-se os modelos de Bala e Woods (1984) modificado, de Corrêa et al. (2004), de Rahman (1995), Exponencial, Linear e Polinomial de segundo grau. O uso de modelos matemáticos tem por função, prever ou simular o comportamento de determinado material, quando submetido a um processo específico. Além disso, pode auxiliar no dimensionamento e execução de projetos de equipamentos para secagem, bem como para a compreensão do processo (CORRÊA et al., 2011).

No cenário agrícola mundial, diversos tipos de feijões têm sido estudados quanto à variação de suas propriedades físicas durante o processo de dessecagem ou adsorção, que segundo Corrêa et al. (2006a), consiste na perda ou ganho de água, respectivamente, por determinado produto. Podem ser citados o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), feijão-adzuki (*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & Ohashi), feijão-da-china (*Vigna mungo* L.) e feijão-macassar (*Vigna sinensis* L.) (RESENDE et al., 2005; ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; RESENDE et al., 2008b; OLIVEIRA et al., 2014; THEERTHA et al., 2014).

Davies e Zibokere et al. (2011) e Di Lanaro et al. (2011) realizaram estudos referentes aos efeitos do processo de re-umedecimento sobre as propriedades físicas de sementes de feijão-caupi. Entretanto, ressalta-se que as propriedades físicas de produtos agrícolas também podem ser influenciadas pelos processos de adsorção e dessecagem (SIQUEIRA et al., 2012b).

Dada à importância do processo de secagem, somada à ausência de informações referentes ao comportamento das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi durante a secagem, objetivou-se com o presente trabalho caracterizar a variação das propriedades físicas das sementes de feijão-caupi nos diferentes teores de água durante a secagem em temperatura de 40°C.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (FCA/UFGD), Dourados - MS.

Foram utilizadas sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), cultivar BRS Guariba, produzidas na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da UFGD, entre os meses de fevereiro a junho de 2015. O local situa-se em latitude de 22°48'S, longitude de 54°44'W (ABREU, 2013) e altitude média de 452 m (MOTA et al., 2013). O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, com período chuvoso compreendido entre os meses de outubro e março e precipitação média anual variando de 1300 a 1750 mm (ARAI et al., 2010). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2006), com teores de argila, silte e areia na ordem de 56, 9 e 35%, respectivamente (BOTTEGA et al., 2011). Ao longo do ciclo da cultura foram realizados os devidos tratos culturais, com intuito de se produzir sementes de feijão-caupi com qualidade adequada.

Sementes em vagens foram colhidas, manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,54 decimal base seca (b.s.), sendo o teor de água determinado pelo método de estufa, a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas e em duplicata (BRASIL, 2009). Após a colheita, realizou-se o procedimento de debulha manual das sementes, sendo posteriormente acondicionadas em embalagem constituída de três embalagens polipropileno de baixa densidade e armazenadas em câmara do tipo B.O.D. (*Biochemical Oxygen Demand*), regulada a $3,5^{\circ}\text{C}$, durante três dias. Tais procedimentos tiveram por objetivos minimizar a perda de água pela massa do material na forma de vapor para ar circundante, homogeneizar seu teor de água e, por fim, reduzir metabolismo do produto e de micro-organismos presentes nas sementes até o momento da secagem.

Anteriormente à secagem, realizou-se a homogeneização e preparação das amostras do produto, sendo novamente realizada a determinação do teor de água (BRASIL, 2009). Após esses procedimentos, o produto foi submetido à secagem em

estufa com ventilação forçada de ar, regulada a temperatura de 40°C. Utilizou-se tal temperatura por permitir um bom espaçamento entre as leituras nos testes.

De posse do teor de água inicial ($0,47 \pm 0,01$ decimal b.s.), o acompanhamento da redução do teor de água das sementes ao longo da secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa), até atingirem teor de água final de $0,11 \pm 0,01$ decimal b.s. Para o acompanhamento da perda de massa durante a secagem nos testes de massa específica aparente e contração volumétrica da massa, utilizou-se uma balança semianalítica com resolução de 0,01 g. Para as demais propriedades físicas, foi utilizada balança semianalítica com resolução de 0,001 g. Os teores de água inicial e final das sementes de feijão-caupi foram determinados pelo método gravimétrico, em estufa regulada a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, por 24 horas, sempre em duplicata (BRASIL, 2009).

Devido às particularidades de cada avaliação, nem todas as propriedades foram determinadas nos mesmos teores de água, estando, entretanto, dentro da faixa de 0,48 a 0,10 decimal b.s.

As propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, em cada teor de água obtido durante a secagem, foram determinadas por meio dos seguintes testes:

1.2.1. Massa específica aparente e massa específica real ou unitária

A massa específica aparente (ρ_{ap}) das sementes de feijão-caupi foi determinada em balança de peso hectolítrico com recipiente cilíndrico de volume de 1,0 L, em cinco repetições. A cada avaliação, as sementes foram acondicionadas no recipiente cilíndrico e, em seguida, realizou-se a leitura da massa da amostra em balança semianalítica com precisão de 0,01 g. Os resultados foram expressos em kg m^{-3} .

Para a determinação da massa específica real (ρ_u), 20 sementes de feijão-caupi foram selecionadas aleatoriamente e secadas individualmente. Em cada teor de água obtido durante a secagem, foram realizadas as medições dos eixos perpendiculares do produto, comprimento (a), largura (b) e espessura (c), conforme ilustrado na Figura 1, com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

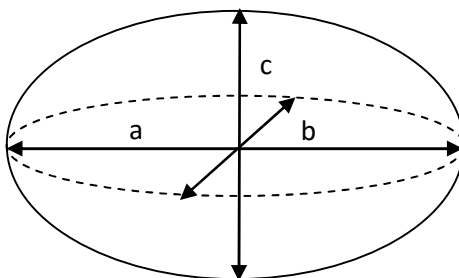


FIGURA 1. Representação dos eixos perpendiculares das sementes de feijão-caupi.

em que:

- a: comprimento ou maior eixo, mm;
- b: largura ou eixo médio, mm; e
- c: espessura ou menor eixo, mm.

De posse das dimensões dos eixos perpendiculares, determinou-se o volume de cada semente de feijão-caupi, utilizando-se a Equação 1, proposta por Mohsenin (1986), considerando a forma do produto como elipsóide escaleno (Figura 1).

$$V_g = \frac{\pi (a b c)}{6} \quad (1)$$

em que:

V_g : volume, mm^3 .

A escolha dessa equação para calcular o volume individual das sementes baseou-se em testes preliminares realizados com tolueno, onde o volume real do produto foi comparado ao volume calculado pela equação, os quais apresentaram valores próximos.

De posse do volume unitário e da massa unitária das sementes, a qual foi determinada em balança semianalítica com precisão de 0,001 g, calculou-se a massa específica real pela Equação 2, sendo os resultados expressos em kg m^{-3} .

$$\rho_u = \frac{m_g}{V_g} 10^6 \quad (2)$$

em que:

ρ_u : massa específica real ou unitária, kg m^{-3} ;
 m_g : massa unitária, g.

1.2.2. Porosidade da massa

A porosidade da massa de sementes de feijão-caupi foi determinada de maneira indireta, por meio da Equação 3 (MOHSENIN, 1986). Para esse cálculo, foram utilizados dados experimentais da massa específica real e valores da massa específica aparente, estimados pelo modelo de regressão. Isso porque, a massa específica aparente, neste estudo, possui maior número de dados observados e melhor ajuste de regressão em relação à massa específica real.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) 100 \quad (3)$$

em que:

ε : porosidade intergranular, %;
 ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} ; e
 ρ_u : massa específica real ou unitária, kg m^{-3} .

1.2.3. Massa de mil sementes

Para cada teor de água obtido, realizou-se a escolha aleatória de 100 sementes de feijão-caupi, em oito repetições, sendo determinada a massa de cada repetição em balança semianalítica com resolução de 0,001 g. A massa de mil sementes foi obtida pela multiplicação da massa média das oito repetições por 10 e os resultados foram expressos em g (BRASIL, 2009).

1.2.4. Dimensões características

Foram avaliadas as variações dos eixos perpendiculares (a, b e c) do produto durante a secagem, em 20 sementes de feijão-caupi, conforme descrito no item 1.2.1, sendo também determinados os índices de contração dos mesmos (ψ_a , ψ_b e ψ_c), conforme as Equações 4, 5 e 6.

$$\psi_a = \frac{a}{a_0} \quad (4)$$

$$\psi_b = \frac{b}{b_0} \quad (5)$$

$$\psi_c = \frac{c}{c_0} \quad (6)$$

em que:

- a: comprimento do maior eixo em determinado teor de água, mm;
- a_0 : comprimento inicial do maior eixo, mm;
- b: comprimento do eixo médio em determinado teor de água, mm;
- b_0 : comprimento inicial do eixo médio, mm;
- c: comprimento do menor eixo em determinado teor de água, mm;
- c_0 : comprimento inicial do menor eixo, mm;

O diâmetro geométrico do produto (D_g), em mm, foi obtido conforme a equação proposta por Mohsenin (1986).

$$D_g = \sqrt[3]{a b c} \quad (7)$$

1.2.5. Forma e tamanho

A forma, caracterizada pela circularidade e esfericidade, e o tamanho, caracterizado pela área projetada e superficial, do produto foram obtidos pela medição de seus diâmetros perpendiculares em 20 sementes de feijão-caupi, conforme descrito anteriormente na determinação do volume para calcular a massa específica real (item 1.2.1).

1.2.5.1. Circularidade e esfericidade

A circularidade (C) e a esfericidade (E_s), ambas expressas em porcentagens, foram determinadas por meio das Equações 8 e 9, respectivamente (MOHSEIN, 1986).

$$C = \left(\frac{b}{a}\right) 100 \quad (8)$$

$$E_s = \left[\frac{(a b c)^{1/3}}{a} \right] 100 \quad (9)$$

1.2.5.2. Área projetada e superficial

A área projetada (A_p), em mm^2 , do produto foi determinada pela Equação 10.

$$A_p = \frac{\pi a b}{4} \quad (10)$$

A área superficial (S), em mm², das sementes de feijão-caupi foi calculada pela analogia a uma esfera de mesmo diâmetro geométrico médio, utilizando-se a Equação 11, proposta por Tunde-Akintunde e Akintunde (2004).

$$S = \pi D_g^2 \quad (11)$$

Outro método empregado para o cálculo da área superficial das sementes de feijão-caupi foi através da utilização da equação proposta por Mohsenin (1986), realizando-se ajustes nas dimensões características do produto pelas seguintes expressões:

$$S = \frac{\pi B^2}{2} + \frac{\pi a B}{2 e} \operatorname{sen}^{-1} e \quad (12)$$

sendo:

$$B = (b c)^{1/2} \quad (13)$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{a}\right)^2} \quad (14)$$

A relação superfície/volume (SV), em mm⁻¹, das sementes de feijão-caupi foi determinada pela Equação 15, utilizando-se os valores da área superficial calculada pela Equação 12, proposta por Mohsenin (1986), visto que essa apresenta ajustes matemáticos nas principais dimensões do produto, logo, maior precisão e confiabilidade nos resultados.

$$SV = \frac{S}{V_g} \quad (15)$$

Determinou-se a relação superfície/massa (S_W), em mm², das sementes de feijão-caupi utilizando-se a Equação 16 (MOHSENIN, 1986). Para esse cálculo, utilizaram-se dados da área superficial obtida pelo método proposto por Mohsenin (1986), pelos mesmos motivos citados acima.

$$S_W = \zeta W^d \quad (16)$$

em que:

ζ e d : constantes da relação, adimensionais; e
 W : massa do produto, g.

1.2.6. Índice de contração volumétrica da massa e unitária

Os índices de contração volumétrica, da massa e unitária, das sementes de feijão-caupi ao longo de sua secagem foram determinados pela relação entre o volume do produto em cada teor água obtido e o seu volume inicial, conforme a Equação 17.

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (17)$$

em que:

ψ : índice de contração volumétrica (da massa ou unitária), adimensional;
 V : volume (da massa ou unitário) em cada teor de água, cm^3 ou mm^3 ; e
 V_0 : volume inicial (da massa ou unitário), cm^3 ou mm^3 .

Acompanhou-se a redução do volume da massa do produto ao longo da secagem com base em um volume inicial de 1000 cm^3 (1000 mL) de sementes de feijão-caupi, sendo verificada em uma proveta graduada até 1000 mL , de acordo com a Figura 2. Para cada teor de água obtido, computou-se o volume do produto, em mL , em três determinações, sendo utilizada para o cálculo do índice de contração da massa, a média das três repetições.



FIGURA 2. Ilustração da determinação da contração da massa das sementes de feijão-caupi ao longo da secagem em uma proveta graduada de 1000 mL .

O acompanhamento da redução do volume unitário foi realizado pela medição dos eixos perpendiculares de cada semente, em 20 sementes de feijão-caupi, conforme descrito para a determinação da massa específica real (Item 1.2.1).

Em seguida, ajustaram-se aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos matemáticos empregados para a representação do índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi em função do teor de água do produto

Designação do modelo	Modelo	
Bala e Woods (1984), modificado	$\psi = 1 - a \{1 - \exp[-b(U_0 - U)]\}$	(18)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = 1 / [a + b \cdot \exp(U)]$	(19)
Exponencial	$\psi = a \cdot \exp(b \cdot U)$	(20)
Linear	$\psi = a + b \cdot U$	(21)
Polinomial de segundo grau	$\psi = a + b \cdot U + c \cdot U^2$	(22)
Rahman (1995)	$\psi = 1 + \beta(U - U_0)$	(23)

em que:

ψ : índice de contração volumétrica, adimensional;

U : teor de água do produto, decimal b.s.;

U_0 : teor de água inicial do produto, decimal b.s.;

a , b , e c : parâmetros que dependem do produto, decimal; e

β : coeficiente de contração volumétrica, decimal.

1.2.7. Procedimento estatístico

Os dados experimentais, da massa específica aparente e real, porosidade, massa de mil sementes, área projetada, área superficial e relação superfície/volume das sementes de feijão-caupi, foram submetidos à análise de regressão polinomial de primeiro e segundo grau. O ajuste dos modelos de regressão foi realizado utilizando-se o programa computacional SigmaPlot 11.0, sendo o modelo selecionado de acordo com o nível de significância pelo teste F, valores do coeficiente de determinação (R^2 , em decimal) e o conhecimento do fenômeno em estudo. Já os dados observados da relação superfície/massa foram submetidos à análise de regressão não linear.

Para a avaliação do índice de contração volumétrica da massa e unitária, submeteram-se os dados experimentais à análise de regressão linear e não linear, pelo método Gauss-Newton, sendo os modelos ajustados aos dados experimentais pelo

programa computacional Statistica 8.0. A seleção dos modelos matemáticos para representar o índice de contração volumétrica baseou-se nas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P, em %) e do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal).

Os valores do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa foram calculados conforme as Equações 23 e 24, respectivamente.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (24)$$

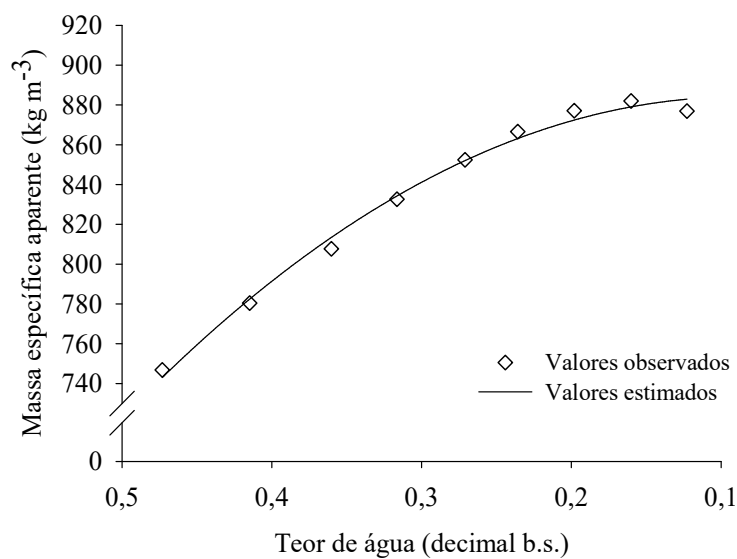
$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (25)$$

em que:

- n: número de observações experimentais;
- Y: valor observado experimentalmente;
- \hat{Y} : valor calculado pelo modelo; e
- GLR: graus de liberdade do modelo.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento nos valores da massa específica aparente das sementes de feijão-caupi conforme a redução do teor de água do produto ao longo da secagem (Figura 3), indicando que a redução do volume da massa do produto foi mais intensa que a perda de água na forma de vapor para o ar de secagem.



$$\rho_{ap} = 877,0458 + 163,6152 U - 944,3636 U^2 \quad (R^2 = 0,9905; P_{level} = <0,0001)$$

FIGURA 3. Massa específica aparente das sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

A variação dos valores experimentais da massa específica aparente (Figura 3) pôde ser satisfatoriamente representada por um modelo de regressão polinomial de segundo grau, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação (99%) e probabilidade de erro inferior a 1%. Os valores médios da massa específica aparente, estimados pelo modelo, variaram de 743,0 a 882,9 kg m⁻³ em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,12 decimal b.s., respectivamente. O comportamento quadrático da curva estimada pelo modelo indica que, possivelmente, a partir do teor de 0,09 decimal b.s. a massa específica aparente apresentaria tendência de redução.

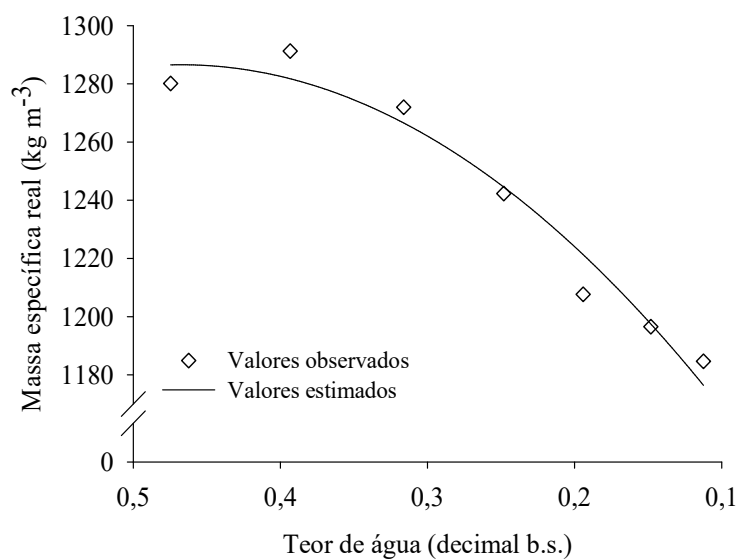
Davies e Zibokere (2011) e Di Lanaro et al. (2011), ambos trabalhando com o método de re-umedecimento, encontraram comportamento similar para a massa

específica aparente de sementes de feijão-caupi. Esse fenômeno também foi verificado para outros tipos de feijões, como feijão-comum (RESENDE et al., 2005; ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; RESENDE et al., 2008b), feijão-da-china (THEERTHA et al., 2014) e feijão-macassar (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007), e diversos outros produtos agrícolas (RIBEIRO et al., 2005; ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; FIROUZI et al., 2009; PAYMAN et al., 2011).

Davies e Zibokere (2011), trabalhando com o método de re-umedecimento em sementes de três cultivares nigerianas de feijão-caupi, encontraram, para a massa específica aparente, valores que variaram, em média, de 706,6 a 636,4 kg m⁻³ em uma faixa de teor de água de 0,15 a 0,30 decimal b.s. Verificou-se que, embora tenham apresentado a mesma tendência, os valores da massa específica obtidos por Davies e Zibokere (2011) foram inferiores aos do presente estudo, independentemente do teor de água avaliado (Figura 3). Possivelmente, essa diferença esteja relacionada ao menor tamanho das sementes avaliadas no presente trabalho, visto que, segundo Davies e Zibokere (2011), uma massa constituída de sementes menores tende a apresentar maior compactação em relação àquela composta por sementes de maiores dimensões, promovendo maiores magnitudes de massa específica aparente. Além disso, possíveis diferenças de forma e composição química entre as cultivares avaliadas por Davies e Zibokere (2011) e as do presente estudo sejam responsáveis pela diferença entre os valores de massa específica aparente.

Houve redução dos valores da massa específica real do produto conforme o decréscimo de seu teor de água, sendo esse fenômeno satisfatoriamente representado por um modelo de regressão polinomial de segundo grau (Figura 4).

Esse comportamento (Figura 4) também foi observado para sementes de feijão-da-china (THEERTHA et al., 2014), frutos de mamona (GONELI et al., 2008), sementes e frutos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012b e 2012c) e sementes e frutos de amendoim (ARAUJO et al. 2014 e 2015). Entretanto, contrário ao verificado para sementes de feijão-comum (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; RESENDE et al., 2008b), feijão-macassar e ervilha (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007) e soja (RIBEIRO et al., 2005).



$$\rho_u = 1095,6696 + 816,5899 U - 873,2685 U^2 \quad (R^2 = 0,9439; P_{\text{level}} = <0,0014)$$

FIGURA 4. Massa específica real das sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Os valores médios estimados da massa específica real das sementes de feijão-caupi variaram de 1286,5 a 1176,4 kg m⁻³ em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., respectivamente (Figura 4).

Os resultados obtidos indicaram que a redução da massa individual do produto ao longo da secagem foi mais intensa que a de seu volume, assim, resultando na redução da massa específica real, comportamento contrário ao verificado para massa específica aparente (Figura 3). Provavelmente, esse resultado esteja relacionado à formação de espaços vazios no interior das sementes conforme a redução do seu teor de água, como verificado na Figura 5.

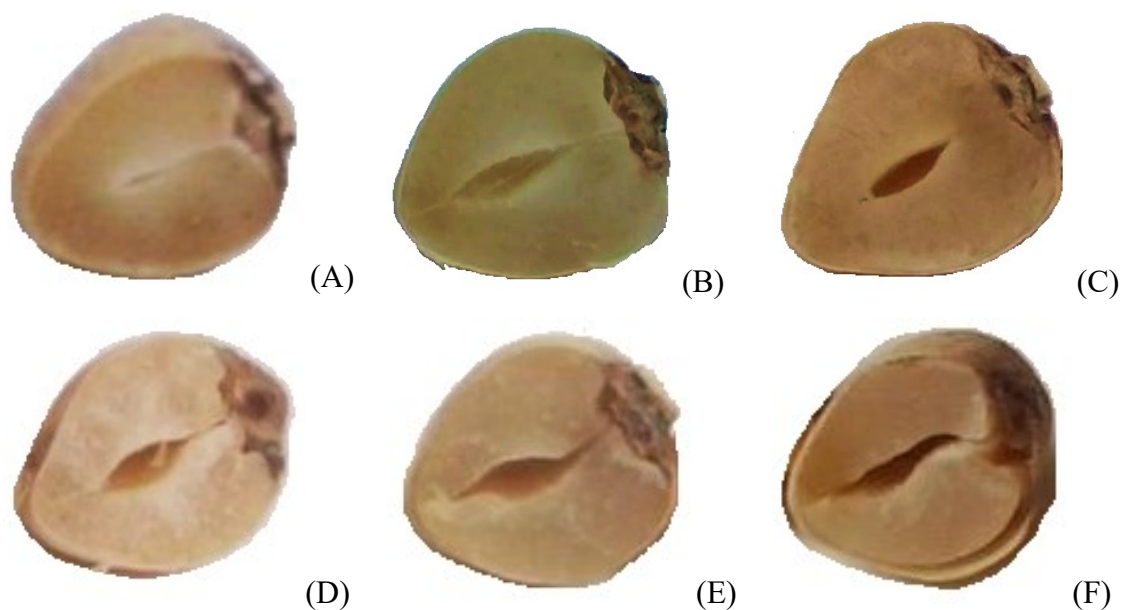


FIGURA 5. Corte transversal em sementes de feijão-caupi com teores de água de 0,40 (A); 0,33 (B); 0,26 (C); 0,20 (D); 0,14 (E); e 0,09 (F) decimal b.s.

Embora as figuras não estejam em mesma escala, constata-se que, à medida que se reduziu o teor de água do produto, houve o desprendimento de seus cotilédones, juntamente com a redução da espessura dos mesmos na região central de contato, acarretando na formação de espaços vazios em seu interior (Figuras 5A, 5B, 5C, 5D, 5E e 5F). Além disso, quando secados até o teor de água de 0,09 decimal b.s., é possível observar, também, a ocorrência de espaços vazios entre o tegumento e a parte externa dos cotilédones das sementes.

Assume-se a possibilidade de que esse fenômeno (Figuras 5A, 5B, 5C, 5D, 5E e 5F) tenha influenciado negativamente no encolhimento das dimensões externas das sementes durante o processo de secagem, principalmente a espessura. Assim, o produto teve a capacidade de reduzir seu volume, prejudicada, ao passo que perda de massa na forma de vapor de água para ar de secagem ocorreu normalmente, provendo a redução de sua massa específica real (Figura 4). A formação de espaços vazios no interior de sementes, a dureza do seu tegumento e a presença de sementes no interior de frutos, têm sido apontadas como as principais causas da redução da massa específica aparente e real apresentada por alguns produtos agrícolas durante a secagem (GONELI et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2012b e 2012c; ARAUJO et al., 2014).

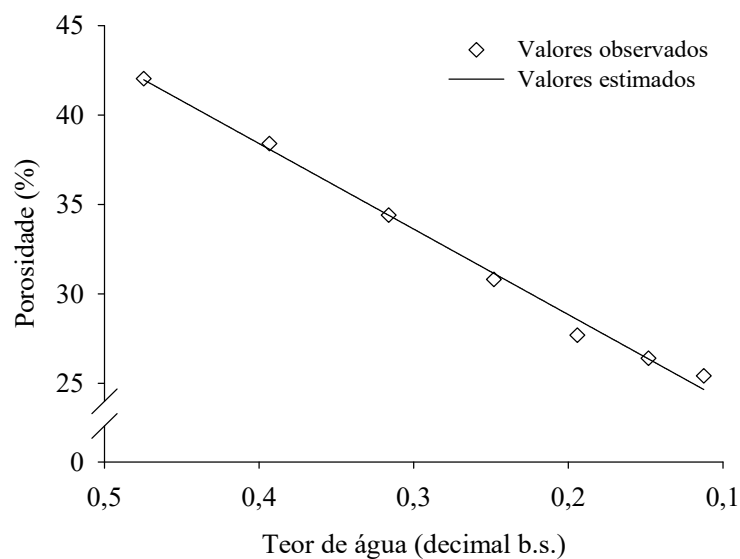
Embora a formação de espaços vazios no interior das sementes de feijão-caupi (Figura 5), possivelmente, tenha influenciado nos resultados da massa específica

real durante a secagem, promovendo decréscimos em seus valores (Figura 4), a mesma não foi capaz de interferir significativamente no comportamento da massa específica aparente, a qual apresentou aumento de sua magnitude na maior faixa de umidade durante a secagem (Figura 3). Esse mesmo comportamento também foi encontrado por Theertha et al. (2014), para sementes de feijão-da-china, e por Firouzi et al. (2009) e Payman et al. (2011), para sementes de amendoim, os quais observaram o contraste entre a massa específica aparente e a massa específica real dos produtos mediante a alteração de seus respectivos teores de água.

Em trabalhos realizados por Davies e Zibokere (2011) e Di Lanaro et al. (2011), também com feijão-caupi, constataram-se comportamentos contrários ao obtido no presente estudo, os quais relataram maiores valores de massa específica real nos menores teores de água das sementes. Entretanto, vale salientar que no estudo em questão, os autores trabalharam com o método de re-umedecimento, podendo esse ser um dos possíveis motivos para a divergência entre os resultados.

Conforme Siqueira et al. (2012b), além do teor de água, a massa específica aparente ou real de produtos agrícolas também podem ser influenciadas pelo processo de dessorção ou adsorção, que, segundo CORRÊA et al. (2006a), consiste na perda ou ganho de água, respectivamente, por determinado produto. Siqueira et al. (2012b) ainda afirmaram que essa divergência pode estar relacionada ao fato de que o encolhimento dos poros capilares, antes preenchidos por água, de produtos agrícolas durante o processo de secagem não ocorre na mesma proporção que são expandidos durante seu re-umedecimento. Isso faz com que haja diferenças em suas características físicas, sendo esse fenômeno conhecido como histerese.

Os valores da porcentagem de porosidade intergranular das sementes de feijão-caupi decresceram linearmente à medida que foi reduzido seu teor de água ao longo da secagem (Figura 6). Os valores médios estimados variaram, aproximadamente, de 42,0 a 24,7% em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s.



$$\varepsilon = 19,2821 + 47,8105 U \quad (R^2 = 0,9935; P_{\text{level}} = <0,0001)$$

FIGURA 6. Porcentagem de porosidade intergranular da massa de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

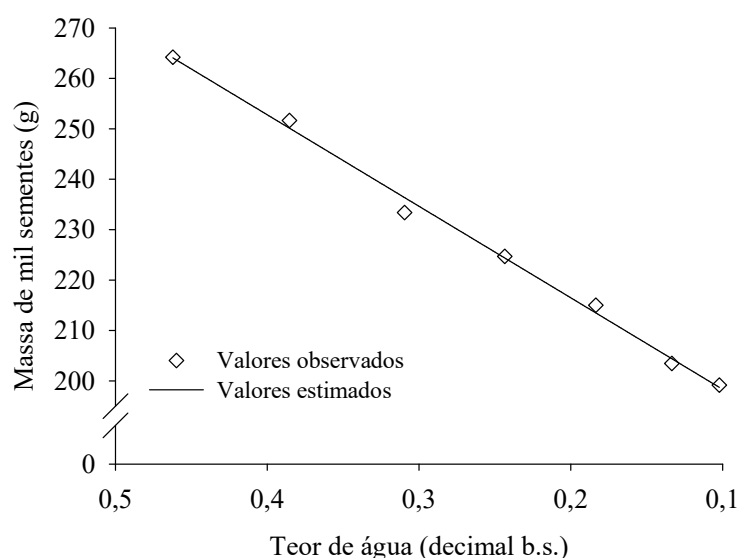
Esse comportamento para a porosidade intergranular (Figura 6) assimila-se aos verificados por Davies e Zibokere (2011) e Di Lanaro et al. (2008), em sementes de feijão-caupi, Theertha et al. (2014), com feijão-da-china, Altuntas e Demirtola (2007) e Resende et al. (2005 e 2008b), com feijão-comum, e aos encontrados para diversos outros produtos agrícolas (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; GONELI et al., 2008; PAYMAN et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012b; ARAUJO et al., 2015). Já para sementes de feijão-macassar (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007) e de amendoim (ARAUJO et al., 2014) foi encontrado comportamento contrário para a porosidade intergranular da massa dos respectivos produtos, apresentando maiores porcentagens de espaços vazios nos menores teores de água dos materiais.

De acordo com Araujo et al. (2015), no decorrer do processo de secagem, sementes e frutos tendem a apresentar contração volumétrica e que este fenômeno pode proporcionar a redução de espaços vazios na massa granular. Além disso, outros fatores como o teor de água, forma, tamanho e características de superfície também influem diretamente sobre os valores de porosidade intergranular de produtos agrícolas (SIQUEIRA et al., 2012c; ARAUJO et al., 2014 e 2015). Davies e Zibokere (2011) e Theertha et al. (2014) afirmaram que a porosidade é uma característica essencial para o dimensionamentos de sistemas de aeração, resfriamento, secagem e aquecimento de

produtos agrícolas na pós-colheita, além de servir como auxílio para projetistas de secadores e contêineres.

Ressalva-se que a porosidade da massa de sementes de feijão-caupi (Figura 6) foi determinada indiretamente, levando-se em consideração a relação entre a massa específica aparente e a massa específica real do produto (Equação 3). Desse modo, supõe-se que, apesar da massa específica real do produto ter decrescido conforme a redução do seu teor de água (Figura 4), quando em conjunto, as sementes tenderam a se rearranjarem, reduzindo os espaços vazios na massa (Figura 6) e, conseqüentemente, promovendo o aumento da massa específica aparente (Figura 3). Esse comportamento também foi verificado para sementes de feijão-da-china (THEERTHA et al., 2014) e de amendoim (PAYMAN et al., 2011), onde constataram-se o aumento da massa específica aparente em contraste às reduções da massa específica real e da porosidade intergranular.

Com a redução do teor de água do produto, em uma faixa de 0,46 a 0,10 decimal b.s., a característica de massa de mil sementes teve suas magnitudes reduzidas linearmente, onde os valores médios estimados variaram de 264,1 a 198,7 g (Figura 7). Esse foi um comportamento esperado, sendo relatado também para outras cultivares de feijão-caupi (DAVIES e ZIBOKERE, 2011; DI LANARO et al., 2011) e para outros tipos de feijões (RESENDE et al., 2008b; THEERTHA et al., 2014).



$$M_{1000} = 180,1714 + 181,5411 U \quad (R^2 = 0,9950; P_{\text{level}} = <0,0001)$$

FIGURA 7. Massa de mil sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

No sentido prático, a massa de mil sementes é uma importante ferramenta para o cálculo de densidade de semeadura, número de sementes por embalagem e a massa da amostra de trabalho para análise de pureza, quando essa não estiver especificada nas Regras para Análise de Sementes. As informações obtidas por essa característica dão ideia do tamanho das sementes, bem como de seu estado de maturidade e sanidade (BRASIL, 2009).

Na Tabela 2 encontram-se as magnitudes das dimensões características (comprimento, largura, espessura e diâmetro geométrico), volume individual, índices de contração dos eixos perpendiculares, circularidade e esfericidade das sementes de feijão-caupi para os diferentes teores de água obtidos durante a secagem.

TABELA 2. Dimensões características, volume unitário (V_g), índices de contração dos eixos perpendiculares, circularidade (C) e esfericidade (E_s) de sementes de feijão-caupi em função do teor de água

U	Dimensões características (mm)				V_g (mm ³)	Índices de contração			C (%)	E_s (%)
	a	b	c	D_g		Ψ_a	Ψ_b	Ψ_c		
0,47	10,27	7,14	5,72	7,48	218,93	1,00	1,00	1,00	69,52	72,90
0,39	9,98	6,91	5,67	7,32	205,06	0,97	0,97	0,99	69,29	73,32
0,32	9,77	6,81	5,64	7,21	196,67	0,95	0,95	0,99	69,72	73,82
0,25	9,66	6,74	5,60	7,14	190,96	0,94	0,94	0,98	69,81	73,97
0,19	9,57	6,71	5,59	7,11	187,93	0,93	0,94	0,98	70,08	74,22
0,15	9,44	6,63	5,56	7,03	182,36	0,92	0,93	0,97	70,30	74,54
0,11	9,35	6,58	5,54	6,98	178,49	0,91	0,92	0,97	70,33	74,69

U: teor de água (decimal, b.s.); a: comprimento; b: largura; c: espessura; e D_g : diâmetro geométrico.

Verifica-se que as dimensões características do produto (a, b e c) apresentaram reduções em suas magnitudes conforme o decréscimo do teor de água (Tabela 2). Analisando os índices de contração, ainda na Tabela 2, verifica-se que as dimensões de comprimento (a) e largura (b) das sementes de feijão-caupi apresentaram valores de contração próximos, 9 e 8%, respectivamente, em relação aos seus respectivos valores iniciais, para uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. Por outro lado, para a mesma faixa de teor de água, a espessura (c) reduziu apenas 3%, possivelmente em função da formação de espaços vazios no interior das sementes deste estudo (Figuras 5A, 5B, 5C, 5D, 5E e 5F), assim, dificultando a redução da espessura do produto.

Esse comportamento para a variação das dimensões características das sementes de feijão-caupi (Tabela 2), também foi relatado por Di Lanaro et al. (2011), também com sementes de feijão-caupi. Isso também foi encontrado para diversos outros tipos de feijões (RESENDE et al., 2005; ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; THEERTHA et al., 2014), entre outros produtos agrícolas, como soja (RIBEIRO et al., 2005), mamona (GONELI et al., 2011) e amendoim (PAYMAN et al., 2011; ARAUJO et al., 2014).

Davies e Zibokere (2011), trabalhando com o método de re-umedecimento em sementes de três cultivares nigerianas de feijão-caupi, verificaram que as dimensões a, b e c dos produtos variaram em média, respectivamente, 28, 21 e 20%, para uma faixa de teor de água de 0,15 a 0,30 decimal b.s., sendo uma variação superior ao do presente estudo (Tabela 2), embora tenha apresentado o mesmo comportamento. Provavelmente, essa divergência entre os resultados obtidos no estudo em questão e os verificados no presente trabalho esteja relacionada às particularidades físicas apresentadas pelos genótipos de mesma espécie ou a metodologia de trabalho utilizada.

O diâmetro geométrico (D_g) das sementes de feijão-caupi apresentou redução de, aproximadamente, 6,7% em relação ao seu valor inicial, em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. (Tabela 2), tendência também encontrada por Davies e Zibokere (2011), com feijão-caupi, também verificada para outros tipos de feijões (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; THEERTHA et al., 2014) e diversas outras espécies agrícolas (GONELI et al., 2011; PAYMAN et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012a; OLIVEIRA et al., 2013; ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Ao avaliarem o método de re-umedecimento, Davies e Zibokere (2011) constataram variações superiores para o diâmetro geométrico de sementes de três cultivares nigerianas de feijão-caupi em relação ao presente estudo, em média 23%, em uma faixa de teor de água de 0,15 a 0,30 decimal b.s. Essa divergência entre resultados, possivelmente, se deve às peculiaridades físicas verificadas entre os genótipos de mesma espécie, entre outros fatores já discutidos anteriormente.

Ainda na Tabela 2, constatou-se que o volume unitário do produto teve sua magnitude reduzida em, aproximadamente, 18,5% em relação ao volume inicial, em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., estando de acordo com o comportamento verificado para outros tipos de feijões (RESENDE et al., 2005; ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007) e para diversos outros produtos agrícolas (RIBEIRO et al., 2005; GONELI et al., 2011; PAYMAN et al., 2011; SIQUEIRA et al.,

2012d; ARAUJO et al., 2014 e 2015). Davies e Zibokere (2011), trabalhando com o método de re-umedecimento em sementes de três cultivares nigerianas, verificaram que o volume unitário médio dessas variou acerca de 47%, em uma faixa de teor de água de 0,15 a 0,30 decimal b.s..

Conforme Goneli et al. (2011) e Araujo et al. (2014), durante o processo de secagem, o volume de produtos agrícolas é, normalmente, o que mais sofre variação, sendo que, na maioria dos casos, essa alteração volumétrica do produto resulta na redução do seu tamanho ou, ainda, na sua forma geométrica.

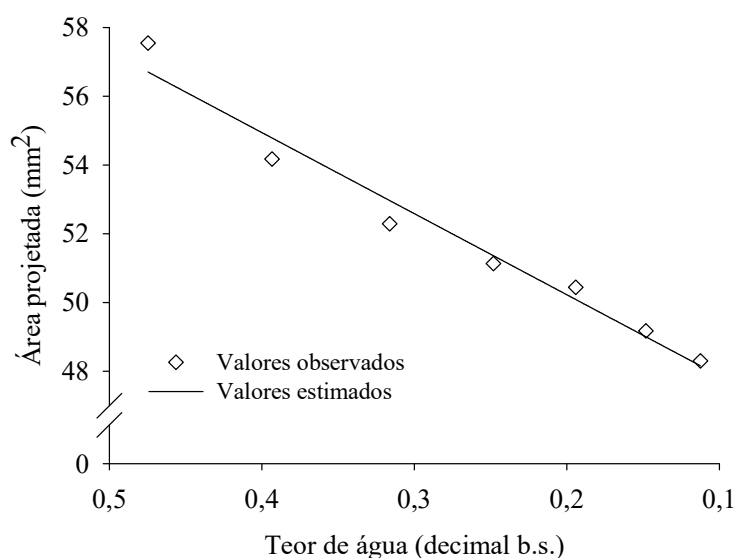
Na Tabela 2 pode também ser verificado que a circularidade do produto sofreu leve decréscimo, 0,23%, na faixa de teor de água compreendida entre 0,47 a 0,39 decimal b.s., seguida de acréscimo de 1,04% entre os teores de água de 0,39 a 0,11 decimal b.s. Por sua vez, a esfericidade das sementes de feijão-caupi acresceu em 1,79% em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s.

Esses resultados indicaram que, de modo geral, o produto tende a ficar mais circular e esférico conforme a redução do seu teor de água (Tabela 2), concordando com o comportamento verificado por Di Lanaro et al. (2011), também com feijão-caupi, e Resende et al. (2005), com feijão-comum. Porém, os resultados obtidos para essas características, no presente estudo, contrariam os encontrados para outros produtos agrícolas (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007; GONELI et al., 2011; PAYMAN et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012d; ARAUJO et al., 2014 e 2015), os quais tiveram seus valores de circularidade e esfericidade decrescidos, conforme a redução de seus teores de água. Já Davies e Zibokere (2011) e Theertha et al. (2014), trabalhando com o método de re-umedecimento, não constataram tendência definida para a esfericidade de sementes de feijão-caupi e de feijão-da-china, respectivamente, frente à variação de seus respectivos teores de água.

Ressalva-se que os valores de circularidade e esfericidade do produto pouco variaram, evidenciando os baixos índices de contração de suas dimensões características (Tabela 2). Isto porque a circularidade, obtida neste estudo, é uma razão entre a largura (b) e o comprimento (a) do produto e o cálculo da esfericidade considera os valores dos três eixos perpendiculares (a, b e c) (Equações 8 e 9). Pequenas variações de circularidade e esfericidade também foram constatadas em sementes de feijão-comum (RESENDE et al., 2005), frutos de mamona (GONELI et al., 2011) e sementes e frutos de amendoim (ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Além disso, verificou-se que os valores da circularidade e da esfericidade do produto mantiveram-se abaixo de 71 e 75%, respectivamente (Tabela 2). Mohsenin (1986) consideraram que, para que produtos agrícolas, como sementes e frutos, sejam considerados como circulares e esféricos, esses devem apresentar magnitudes de circularidade e de esfericidade, respectivamente, acima de 90%. Desse modo, impossibilita-se a classificação das sementes de feijão-caupi, neste estudo, como circulares e esféricas, independentemente do teor de água avaliado (Tabela 2). Resultados similares foram relatados por Davies e Zibokere (2011), também com feijão-caupi, Theertha et al. (2014), com feijão-da-china, Resende et al. (2005), com feijão-comum, e por Araujo et al. (2014 e 2015), com sementes e frutos de amendoim, respectivamente.

Houve redução linear dos valores da área projetada à medida que se reduziu o teor de água das sementes de feijão-caupi (Figura 8), evidenciando a contração das dimensões de comprimento (a) e largura (b) do produto durante a secagem. Os valores médios estimados variaram de 56,6 a 48,1 mm², em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., representando um decréscimo de acerca de 15,0% na área projetada das sementes em estudo.

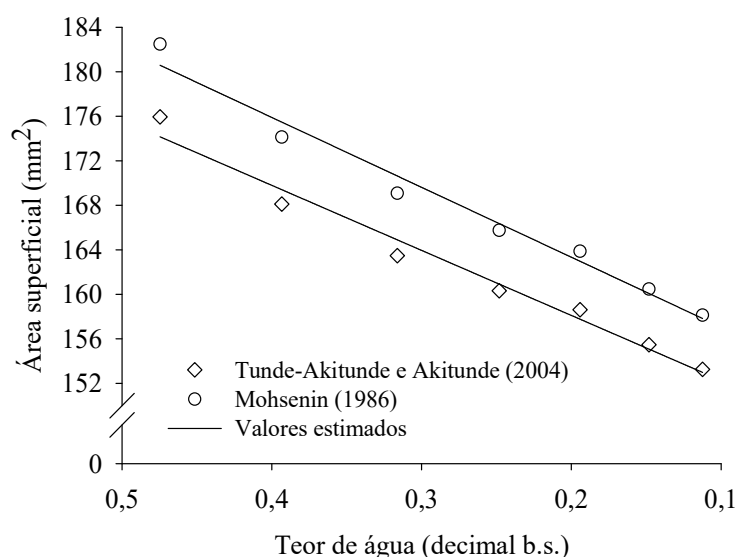


$$A_p = 45,5073 + 23,5918U \quad (R^2 = 0,9647; P_{\text{level}} = <0,0001)$$

FIGURA 8. Área projetada de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Os resultados obtidos para a área projetada das sementes de feijão-caupi (Figura 8) estão de acordo com os verificados para sementes de feijão-comum e feijão-macassar (ALTUNTAS e DEMIRTOLA, 2007) e diversos outros produtos agrícolas (PAYMAN et al., 2011; GONELI et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2012d; ARAUJO et al., 2014 e 2015). Para Goneli et al. (2008) e Araujo et al. (2014 e 2015), a redução da área projetada de produtos agrícolas pela redução do teor de água está relacionada ao decréscimo de seu volume durante o processo de secagem. Araujo et al. (2015) ainda afirmaram que esse fenômeno pode afetar substancialmente a passagem de ar pela massa do produto durante sua secagem e/ou processamento.

Observa-se que, independentemente do método utilizado para o cálculo da área superficial do produto, as sementes de feijão-caupi tiveram seus valores de área superficial reduzidos linearmente à medida que decresceu seu teor de água (Figura 9).



$$S_{\text{(Tunde-Akintunde e Akintunde, 2004)}} = 146,4173 + 58,4474U \quad (R^2 = 0,9731; P_{\text{level}} = <0,0001)$$

$$S_{\text{(Mohsenin, 1986)}} = 150,7743 + 62,8128U \quad (R^2 = 0,9738; P_{\text{level}} = <0,0001)$$

FIGURA 9. Área superficial de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água, utilizando-se modelos propostos por diferentes autores.

Para Siqueira et al. (2012d), a área superficial de produtos agrícolas está intimamente relacionada ao seu volume, o qual, no presente trabalho, foi obtido pelas principais dimensões do produto (Equação 1). Logo, esse comportamento (Figura 9) evidência a contração das dimensões características das sementes de feijão-caupi com a redução do seu teor de água. Resultados similares foram verificados por Davies e

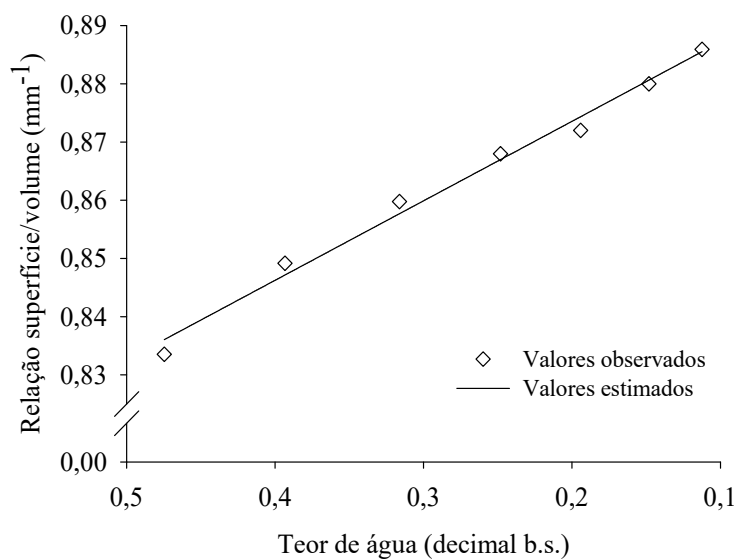
Zibokere (2011), trabalhando com sementes de três cultivares nigerianas de feijão-caupi, e por diversos pesquisadores para diferentes produtos agrícolas (GONELI et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2012d; ARAUJO et al., 2014 e 2015).

Quando calculada pelo método proposto por Tunde-Akintunde e Akintunde (2004), os valores médios estimados da área superficial do produto variaram de 173,9 a 152,9 mm², em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s., representando uma redução de 12,1% (Figura 9). Por sua vez, quando se empregou o método proposto por Mohsenin (1986), os valores variaram de 180,3 a 157,7 mm², representando um decréscimo de 12,5% em sua magnitude, para a mesma faixa de teor de água.

Araujo et al. (2015) afirmaram que a equação proposta por Mohsenin (1986), para a determinação da área superficial de produtos agrícolas, possui maior precisão comparativamente àquela proposta por Tunde-Akintunde e Akintunde (2004), visto que a primeira apresenta ajustes matemáticos nas principais dimensões do produto (comprimento, largura e espessura), levando a valores mais próximos do real. Por sua vez, segundo os mesmos autores, a equação proposta por Tunde-Akintunde e Akintunde (2004) leva em consideração, somente, seu diâmetro médio, tornando duvidosa a precisão de seus resultados.

Além de problemas relacionados à precisão de expressões matemáticas, segundo Araujo et al. (2014 e 2015), fatores como a irregularidade e conformidade característica apresentada pela maioria dos produtos agrícolas, somados à ausência de um número adequado de repetições, tornam difícil e um tanto complexo a determinação da área superficial desses materiais.

Conforme a Figura 10, as sementes de feijão-caupi tiveram seus valores de relação superfície/volume acrescidos linearmente conforme a redução do seu teor de água. Os valores médios estimados sofreram um incremento de, aproximadamente, 5,9% em uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s, indicando que a redução da área superficial do produto não acompanhou o decréscimo do volume do mesmo, assim, promovendo acréscimos nas magnitudes dessa relação. Resultados similares aos obtidos para outros produtos agrícolas (SIQUEIRA et al., 2012d; ARAUJO et al., 2014 e 2015).



$$SV = 0,9009 - 0,1366 U \quad (R^2 = 0,9868; P_{\text{level}} = <0,0001)$$

FIGURA 10. Relação superfície/volume de sementes de feijão-caupi em função de diferentes teores de água.

Araujo et al. (2015) afirmaram que, produtos agrícolas com maior relação entre a área superficial e o volume tendem a apresentar maior dissipação de calor em sua superfície e, conseqüentemente, maior atividade respiratória. Logo, a relação superfície/volume é um importante parâmetro para a avaliação da qualidade de produtos agrícolas, estando diretamente relacionada à perda de água do produto e à escolha de embalagens e condições adequadas para seu processamento e estocagem.

A seguir, está apresentada a equação que representa a relação entre a área superficial e a massa das sementes de feijão-caupi, para uma faixa de teor de água de 0,47 a 0,11 decimal b.s. (Equação 26). Essa equação foi obtida por meio de regressão não linear, a qual apresentou magnitude de coeficiente de determinação superior a 0,96 decimal e nível de significância do modelo de regressão ao nível de 1%.

$$S_W = 331,2315 * W^{0,4779} \quad (R^2 = 0,9681; P_{\text{level}} = <0,0001) \quad (26)$$

São apresentados na Tabela 3, os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o grau de ajuste dos diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi em função do teor de água.

TABELA 3. Valores de desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os diferentes modelos de índice de contração volumétrica da massa (ψ_m) e unitária (ψ_u) das sementes de feijão-caupi

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
	ψ_m (adimensional)		
Bala e Woods (1984), modificado	0,0018	0,1678	0,9999
Exponencial	0,0082	0,7560	0,9977
Polinomial de segundo grau	0,0015	0,1277	0,9999
Linear	0,0143	1,3253	0,9931
Corrêa et al. (2004)	0,0048	0,4025	0,9992
Rahman (1995)	0,0162	1,6160	0,9893
Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
	ψ_u (adimensional)		
Bala e Woods (1984), modificado	0,0064	0,4746	0,9958
Exponencial	0,0090	0,7168	0,9917
Polinomial de segundo grau	0,0076	0,5569	0,9952
Linear	0,0103	0,8420	0,9890
Corrêa et al. (2004)	0,0062	0,5010	0,9960
Rahman (1995)	0,0124	1,0566	0,9810

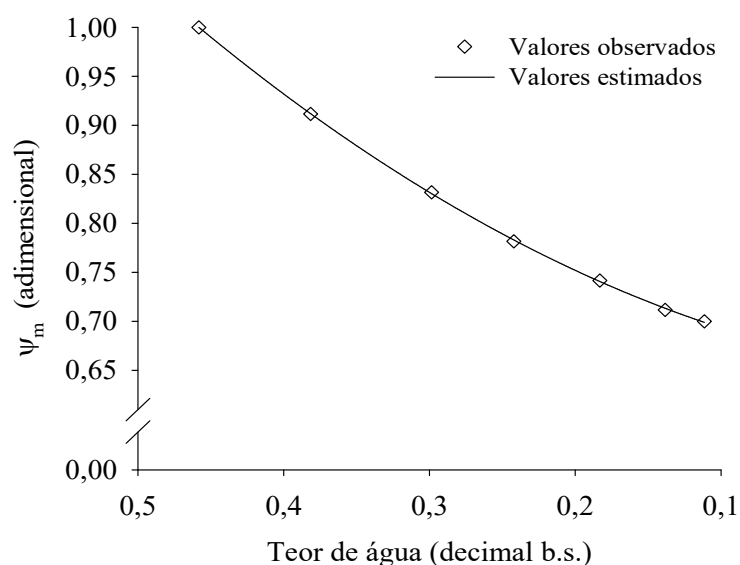
Verifica-se que ambos os modelos empregados para representar o índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi apresentaram valores de coeficiente de determinação superiores a 0,98 decimal (Tabela 3). Isso, segundo Kashaninejad et al. (2007), indica um ajuste satisfatório desses modelos aos dados experimentais da contração volumétrica da massa e unitária do produto em questão. Entretanto, a utilização do coeficiente de determinação como único critério para a comparação entre modelos matemáticos não lineares, não é considerado adequado, sendo recomendada a análise conjunta entre outros parâmetros estatísticos (MADAMBA et al., 1996; MOHAPATRA e RAO, 2005).

Observa-se também que, tanto para índice de contração volumétrica da massa quanto da unitária, ambos os modelos apresentaram valores reduzidos de desvio padrão da estimativa e magnitudes de erro médio relativo inferiores a 2%. (Tabela 3). O erro médio estimado ou desvio padrão da estimativa representa a capacidade que um modelo matemático tem para descrever com fidelidade determinado processo físico, de modo que, quanto mais próximos de zero estiverem seus valores, maior será seu grau de ajuste do modelo aos dados experimentais (DRAPER e SMITH, 1998).

Já o erro médio relativo indica o desvio dos dados experimentais com relação à curva estimada pelo modelo (KASHANINEJAD et al., 2007). Mohapatra e Rao (2005) consideraram que apenas modelos matemáticos que venham a apresentar valores de erro médio relativo inferiores a 10% são adequados para representar o processo em questão.

Baseando-se nessas premissas, considerou-se que todos os modelos empregados para representar o índice de contração volumétrica da massa e unitária das sementes de feijão-caupi foram satisfatórios. Dentre esses, selecionou-se o modelo Polinomial de segundo grau para a representação de ambos os índices de contração volumétrica, da massa e unitária. Goneli et al. (2011) também utilizaram esse modelo para representar o índice de contração volumétrica da massa e unitária de frutos de mamona. Siqueira et al. (2012a) consideraram que tal modelo melhor descreve a contração volumétrica unitária de sementes de pinhão-manso.

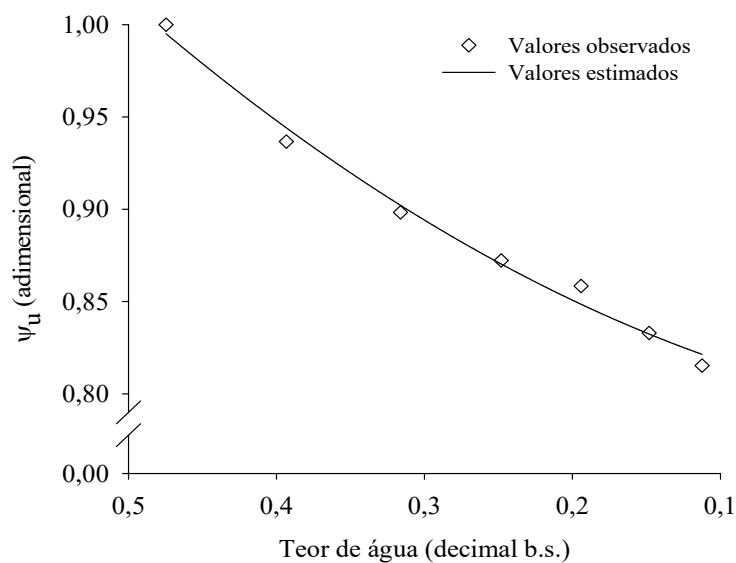
Conforme verificado na Figura 11, a massa do produto apresentou uma redução de acerca de 30% em relação ao seu volume inicial, em uma faixa de teor de água de 0,46 a 0,11 decimal b.s.



$$\Psi_m = 0,6553 + 0,2756 U + 1,0407 U^2$$

FIGURA 11. Índice de contração volumétrica da massa de sementes de feijão-caupi em função do teor de água.

Verifica-se na Figura 12 que, as sementes de feijão-caupi contraíram acerca de 18% em relação ao seu volume inicial, em uma faixa de teor de água de 0,48 a 0,11 decimal b.s.



$$\Psi_u = 0,7955 + 0,1708 U + 0,5262 U^2$$

FIGURA 12. Índice de contração volumétrica unitária de sementes de feijão-caupi em função do teor de água.

Constata-se também que, a contração volumétrica unitária do produto (Figura 12) foi acerca de 12% inferior à do volume da massa do mesmo (Figura 11). Esse mesmo comportamento foi encontrado para sementes de feijão-comum (RESENDE et al., 2005), soja (RIBEIRO et al., 2005) e frutos de mamona (GONELI et al., 2011), onde verificaram-se que as magnitudes da contração volumétrica unitária desses produtos foram, em média, 14,4% inferiores à da massa dos mesmos.

Conforme verificado nas Figuras 5A, 5B, 5C, 5D, 5E e 5F, à medida que se reduziu o teor de água das sementes de feijão-caupi, neste estudo, evoluiu-se o desprendimento dos cotilédones na região central de contato das mesmas, acarretando na formação de espaços vazios em seu interior.

Possivelmente, esse fenômeno tenha dificultado a redução das dimensões externas do produto durante a secagem, principalmente a espessura, resultando em menor intensidade de contração volumétrica individual (Figura 12). Por outro lado, o mesmo fenômeno não teve forte influência sobre a contração volumétrica da massa do material, visto que, quando em conjunto, as sementes de feijão-caupi tenderam a se rearranjar durante a secagem, reduzindo a porosidade intergranular (Figura 6) e, conseqüentemente, resultando em maior amplitude de contração volumétrica (Figura 11).

Considerando-se que as faixas de teores de água avaliadas foram semelhantes, esse comportamento (Figuras 11 e 12), possivelmente, justifica o aumento observado para a massa específica aparente em contraste ao decréscimo da massa específica unitária, conforme a redução do teor de água desse mesmo produto (Figuras 3 e 4).

1.4. CONCLUSÕES

1. A redução do teor de água, dentro da faixa de umidade avaliada, promove alterações em todas as propriedades físicas das sementes de feijão-caupi;
2. O processo de secagem resulta na redução das dimensões características do produto, sendo a espessura, a dimensão que menos contrai, por consequência da formação de espaços vazios no interior das sementes;
3. Dentro da faixa de teor de água avaliada, a secagem promove a contração volumétrica da massa e unitária do produto na ordem de 30 e 18%, respectivamente.

1.5. REFERÊNCIAS

- ABREU, T.S.S. Estrutura de um remanescente de floresta estacional semidecidual ribeirinha da fazenda experimental da Universidade Federal da Grande Dourados, MS. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v.17, n.2, p.71-83, 2013.
- ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.2, n.1, p.72-83, 2009.
- ALTUNTAS, E.; DEMIRTOLA, H. Effect of moisture content on physical properties of some grain legume seeds. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, Wellington, v.35, p.423-433.
- ARAI, F.K.; GONÇALVES, G.G.G.; PEREIRA, S.B.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A.C.T.; DANIEL, O. Espacialização da precipitação e erosividade na bacia hidrográfica do Rio Dourados - MS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.5, p.922-931, 2010.
- ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; ORLANDO, R.C.; MARTINS, E.A.S.; HARTMANN FILHO, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.4, p.170-180, 2015.
- ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.3, p.279-286, 2014.
- BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.30, n.3, p.235-244, 1984.
- BARROS, M.A.; ROCHA, M.M.; GOMES, R.L.F.; SILVA, K.J.D.; NEVES, A.C. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.4, p.403-410, 2013.
- BEZERRA, A.A.C.; TÁVORA, F.J.A.F.; FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q. Morfologia e produção de grãos em linhagens modernas de feijão-caupi submetidas a diferentes densidades populacionais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão, v.8, p.85-93, 2008.
- BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n.2, p.331-336, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 395p.

- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992.
- CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; RIBEIRO, D.M.; SILVA, F.S. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p.162-167, 2006a.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GARIN, S.A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G.H.H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.4, p.716-726, 2011.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n.2, p.117-126, 2006b.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L.D. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: International Drying Symposium, 14th. **Drying 2004**, 2004, São Paulo: Brazil, v.A, p.742-747.
- CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006c.
- DAVIES, R.M.; ZIBOKERE, D.S. Effects of moisture content on some physical and mechanical properties of three varieties of cowpea (*vigna unguiculata (L) walp*). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, Beijing, v.13, n.1, p.1-8, 2011.
- DI LANARO, N.; BAJAY, L.G.; QUEIROZ, V.M.P.; PINTO, R.C.S.; LEITÃO, I.G.A.; LESSIO, B.C.; AUGUSTO, P.E.D. Determinação de propriedades físicas do feijão fradinho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.1, p.27-35, 2011.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 712p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2. ed., 2006. 412p.
- FIROUZI, S.; VISHGAEI, M.N.S.; KAVIANI, B. Some physical properties of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) kernel cv. NC2 as a function of moisture content. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, Dubai, v.6, p.675-679, 2009.

- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, E.S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.33, n.2, p.148-155, 2008.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, n.1, p.1-8, 2011.
- HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, London, v.78, n.1, p.98-108, 2007.
- MACHADO, C.F.; TEIXEIRA, N.J.P.; FREIRE FILHO, F.R.; ROCHA, M.M.; GOMES, R.L.F. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.39, n.1, p.114-123, 2008.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, London, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MELO, F.B.; BELTRÃO, N.E.M.; SILVA, P.H.S. **Cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.) consorciada com feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) no Semi-Árido**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. 89p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 74).
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S.A. thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v.66, n.4, p.513-518, 2005.
- MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- MOTA, L.H.S.; SCALON, S.P.Q.; MUSSURY, R.M. Efeito do condicionamento osmótico e sombreamento na germinação e no crescimento inicial das mudas de angico (*Anadenanthera falcata* Benth. Speg.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Campinas, v.15, n.4, p.655-663, 2013.
- OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; MENDES, U.C.; SMANIOTTO, T.A.S.; DONADON, J.R. Modelagem da contração volumétrica do feijão-adzuki durante a secagem. **Científica**, Jaboticabal, v.42, n.1, p.23-31, 2014.
- OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; SIQUEIRA, V.C.; NETO, C.A.J. Alterações morfológicas em grãos de soja durante o processo de secagem. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.34, n.3, p.975-984, 2013.
- PAYMAN, S.H.; AJDADI, F.R.; BAGHERI, I.; ALIZADEH, M.R. Effect of moisture content on some engineering properties of peanut varieties. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, v.9, n.3 e 4, p.326-331, 2011.
- RAHMAN, S. **Physical properties of foods**. Florida: CRC Press LLC, 1995. 500p.

- RAMOS, I.N.; BRANDÃO, T.R.S.; SILVA, C.L.M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, Mysuru, v.9, n.3, p.201-206, 2003.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008a.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; CECON, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.7, n.1, p.15-24, 2005.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.1, p.225-230, 2008b.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, D.P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.
- RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RODRIGUES, D.H.; GONELI, A.L.D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n.3, p.611-617, 2005.
- ROCHA, M.M.; CARVALHO, K.J.M.; FREIRE FILHO, F.R.; LOPES, A.C.A.; GOMES, R.L.F.; SOUSA, I.S. Controle genético do comprimento do pedúnculo em feijão-caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.270-275, 2009.
- SAGRILO, E.; AZEVEDO, J.N.; SOUSA, V.F.; RAMOS, G.M.; BARBOSA, F.J.V.; ARAÚJO, R.O.C.; SANTOS, J.A.; ARAÚJO, F.S. **Consórcio de mandioca + feijão-caupi adaptado à agricultura familiar**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. 19 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 47).
- SILVA, S.M.S.; MAIA, J.M.; ARAÚJO, Z.B.; FREIRE FILHO, F.R. Composição Química de 45 **Genótipos de Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002. 2 p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 149).
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.34, n.3, p.231-238, 2012a.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas das sementes de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, suplemento 1, p.2705-2714, 2012b.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.5, n.1, p.83-92, 2012c.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; SOARES, F.A.L. Forma e tamanho dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem em cinco condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.864-870, 2012d.

THEERTHA, D.P.; SUJEETHA, J.A.R.P.; ABIRAMI, C.V.K.; ALAGUSUNDARAM, K. Effect of moisture content on physical and gravimetric properties of black gram (*Vigna mungo* L.). **International Journal of Advancements in Research & Technology**, v.3, n.3, p.97-104, 2014.

TOWNER, G.D. The tensile stress generated in clay through drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.37, n.3-4, p.279-289, 1987.

TUNDE-AKINNTUNDE, T.Y.; AKINTUNDE, B.O. Some physical properties of sesame seed. **Biosystems Engineering**, London, v.88, p.127-129, 2004.

CAPÍTULO 2

CINÉTICA DE SECAGEM DE SEMENTES DE FEIJÃO-CAUPI EM CAMADA DELGADA

2.1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi ou feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), espécie de origem africana, é uma cultura de ampla adaptação, sendo cultivado em diversas regiões do Brasil, sobretudo nas Regiões Norte e Nordeste (SILVA et al., 2002; BEZERRA et al., 2008; ROCHA et al., 2009).

Nas últimas décadas, no Brasil, essa cultura tem recebido especial atenção por parte de melhoristas e fitotecnistas, os quais têm buscado a obtenção de novas cultivares, bem como para avaliação do seu potencial de cultivo em sistemas de consórcio (MELO et al., 2003; SAGRILO et al., 2003; MACHADO et al., 2008; BARROS et al., 2013). Entretanto, informações a respeito do manejo pós-colheita de sementes e grãos do feijão-caupi são escassas na literatura recente, mormente, às relacionadas ao processo de secagem das mesmas.

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa, onde o ar de secagem fornece energia na forma de calor aos produtos a serem secados e estes fornecem a massa na forma de vapor de água ao ar de secagem (HALL, 1980). Todavia, ressalta-se que em secagens em temperaturas e umidades relativas que promovam taxas de remoção de água demasiadamente elevadas, a qualidade desses produtos agrícolas pode ser substancialmente afetada (ALMEIDA et al., 2009; RESENDE et al., 2010).

Com a redução do teor de água do produto até níveis seguros, através da secagem, reduz-se a atividade metabólica do mesmo, conseqüentemente, minimizando perdas de sua qualidade fisiológica, física e química durante o armazenamento, além decrescer a atividade de microorganismos e insetos presentes na massa armazenada. A operação de secagem ainda trás como vantagem a possibilidade da realização da colheita antecipada desses materiais, assim, reduzindo o tempo de exposição dos

mesmos às condições biológicas e climáticas adversas encontradas no campo (ALMEIDA et al., 2009; GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2010; SHARADA, 2013; ARAUJO et al., 2014; DOYMAZ et al., 2015).

Para o projeto, modernização, melhoria e estudos de viabilidade comercial de sistemas para secagem de sementes e grãos, a simulação e a obtenção de informações teóricas relativas ao comportamento desses produtos agrícolas durante a secagem são essenciais (ALMEIDA et al., 2009; RESENDE et al., 2010; MENEGHETTI et al., 2012). Para Gely e Giner (2007), na verdade, são essas informações que auxiliam na tomada de decisões nessa etapa, buscando a máxima eficiência do processo e, principalmente, sem afetar a qualidade do produto a ser secado.

Conforme Afonso Júnior e Corrêa (1999), essas simulações baseiam-se na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utilizando-se um modelo matemático que possa descrever com fidelidade a perda de água do material durante a secagem. Entretanto, vale salientar que fatores como a espécie e/ou variedade estudada, bem como as condições ambientais de cultivo, métodos e condições de secagem, métodos de preparo pós-colheita, entre outros, têm influência significativa nas curvas de secagem em camada delgada de produtos capilares, porosos e higroscópicos (CORRÊA et al., 2007; RESENDE et al., 2008; MENEGHETTI et al., 2012; ALVES et al., 2013). Com isso, há a necessidade da caracterização dessas curvas, visando à geração e ampliação de informações que possam representar o comportamento do material nas mais variadas formas de processamento (RESENDE et al., 2008).

Neste sentido, diversos pesquisadores têm avaliado as curvas de secagem em camada delgada de diferentes produtos agrícolas, como folhas (GONELI et al., 2014; MARTINS et al., 2015), frutos (CORRÊA et al., 2010; ALVES et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013), sementes (OLIVEIRA et al., 2012; RESENDE et al., 2014; COSTA et al., 2015; CAMICIA et al., 2015), entre outros produtos de origem vegetal (FERREIRA et al., 2012).

A secagem em camada delgada refere-se àquela com a espessura de apenas uma unidade do produto. A equação obtida para a cinética de dessecção em camada delgada, associada com equações de outras propriedades físicas do produto em questão, fornece um conjunto de relações matemáticas que contribuem para o cálculo e entendimento do processo de secagem em camada espessa (GONELI et al., 2009).

Os modelos matemáticos empregados para descrever a cinética de secagem em camada delgada de produtos agrícolas podem ser divididos em teóricos, que

consideram apenas a resistência interna à transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto, e os semi-teóricos e empíricos, que consideram somente a resistência externa à temperatura e umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; DOYMAZ, 2005; SHARADA et al., 2013).

Conforme Corrêa et al. (2006 e 2007) e Resende et al. (2008 e 2010), modelos semi-teóricos e empíricos são, na maioria das vezes, baseados em variáveis não inerentes ao produto, como a temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Os mesmos autores ainda afirmaram que, indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e água no interior das sementes durante a secagem não são fornecidas por tais modelos, além de considerarem que todo o processo de secagem ocorre, unicamente, em taxas decrescentes. Portanto, considera-se que, esses modelos não refletem toda a complexidade do processo de dessecamento, oferecendo, somente, o compromisso entre a teoria e a aplicação. Todavia, as relações semi-teóricas e empíricas têm se apresentado, na maioria das vezes, como as melhores opções para descrever o processo de dessecamento de produtos agrícolas, embora sua validade seja restrita às condições em que os dados experimentais foram obtidos (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999).

Dentre os modelos teóricos aplicados para a avaliação do processo de secagem de produtos agrícolas, destaca-se o modelo da difusão líquida, a qual é baseada na segunda Lei de Fick (ALMEIDA et al., 2009; GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2010). Essa teoria desconsidera a influência da capilaridade e da contração volumétrica do produto, bem como os efeitos de transferência de energia e massa de um corpo para outro, em função da dificuldade para quantificar os múltiplos efeitos na massa do produto. A mesma considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, resultando, em alguns casos, na discrepância entre resultados experimentais e preditos por modelos. Entretanto, tais suposições, normalmente, são consideradas satisfatórias quando utilizadas em produtos biológicos, devido aos entraves de ordem prática (RESENDE et al., 2007; GONELI et al., 2007 e 2009).

De acordo com Goneli et al. (2009), a difusão líquida em produtos agrícolas durante a dessecamento pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica. Fatores como as particularidades físicas e químicas de cada produto, diferentes métodos de estimação, teores de água iniciais e métodos e condições de secagem, tornam a difusão líquida um processo complexo e um tanto complicado, gerando

elevadas variações em seus valores (CORRÊA et al., 2006; RESENDE et al., 2007 e 2008; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; BAPTESTINI et al., 2014).

De vez que os modelos baseados na segunda Lei de Fick não representam rigorosamente os vários mecanismos que regem o transporte de água em produtos agrícolas (GONELI et al., 2009), convencionou-se classificar o coeficiente de difusão em aparente ou efetivo (ROCA et al., 2008). O coeficiente de difusão efetivo é uma importante propriedade no transporte de água, a qual, frequentemente apresenta dependência com a temperatura do ar de secagem (BAPTESTINI et al., 2014).

Para Oliveira et al. (2013), o estudo das propriedades termodinâmicas de um produto durante a secagem, tem por objetivos solucionar problemas referentes às questões de estabilidade e melhoria dos processos industriais. Segundo os mesmos autores, informações referentes à entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs dão idéia do nível de afinidade do adsorvente pela água, bem como da espontaneidade do processo de sorção. Conforme Corrêa et al. (2010), essas informações também podem ajudar no estudo das propriedades da água adsorvida, bem como para avaliar a microestrutura de alimentos e os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos mesmos. Além disso, segundo os mesmos autores, são de importância para o auxílio no projeto de equipamentos de secagem e no cálculo da energia requerida nesse processo.

Além da temperatura, a velocidade do ar de secagem também tem sido foco de estudo para a cinética de secagem em camada delgada de produtos agrícolas (KASHANINEJAD et al., 2007; RESENDE et al., 2014), evidenciando a importância dessa variável nos processos de secagem, embora seus efeitos, na maioria das vezes, sejam menos significativos que do fator temperatura. Como a velocidade com que a água é removida de sementes e grãos durante o processo de secagem afeta diretamente em sua integridade física e fisiológica, supõe-se que, além do fator temperatura, a velocidade do ar de secagem também é de importância para estudos dessa natureza.

Considerando-se a importância do estudo teórico do processo de secagem de produtos agrícolas, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a cinética de secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi, ajustando diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de razão de umidade, bem como determinar o coeficiente de difusão efetivo, energia de ativação e propriedades termodinâmicas para a secagem em diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizada no município de Dourados, MS.

Foram utilizadas sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), cultivar BRS Guariba, produzidas na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da UFGD, entre os meses de fevereiro a maio de 2015. O local situa-se em latitude de 22°48'S, longitude de 54°44'W (ABREU, 2013) e altitude média de 452 m (MOTA et al., 2013). O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, com período chuvoso compreendido entre os meses de outubro a março e precipitação média anual variando de 1300 a 1750 mm (ARAI et al., 2010). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (EMBRAPA, 2006), com teores de argila, silte e areia na ordem de 56; 9 e 35%, respectivamente (BOTTEGA et al., 2011). Ao longo do ciclo da cultura foram realizados os devidos tratos culturais, com intuito de se produzir sementes de feijão-caupi com qualidade adequada.

Sementes em vagens foram colhidas, manualmente, com teor de água de, aproximadamente, 0,54 decimal b.s. (base seca), sendo o teor de água determinado pelo método de estufa, a 105±3°C, durante 24 horas e em duplicata, conforme as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009). Em seguida, realizou-se o processo de debulha manual, com posterior retirada de sementes verdes, defeituosas ou com contaminação fúngica elevada, visando à redução de interferências externas nos resultados da pesquisa.

Após a debulha, as sementes foram acondicionadas em embalagem constituída de três embalagens de polipropileno devidamente lacradas e, em seguida, mantidas em câmara incubadora do tipo B.O.D. (*Biochemical Oxygen Demand*), regulada a 3,5°C, durante três dias. Esses procedimentos tiveram por objetivos minimizar a perda de água pelas sementes para o ar circundante, homogeneizar seu teor de água e, por fim, reduzir metabolismo do produto e de micro-organismos presentes nas sementes até o momento da secagem.

Os testes de secagem foram realizados em secador experimental de leito fixo (Figura 1), o qual possui como características uma fonte de aquecimento constituída por um conjunto de resistências elétricas, totalizando 12 kW de potência, e um ventilador Siroco, da marca Ibraum, modelo VSI-160, com motor de 1 cv. A temperatura foi controlada por meio de um controlador universal de processos, da marca Novus, modelo N1200, trabalhando com controle proporcional integral derivativo (PID), e o fluxo de ar foi selecionado por meio de um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador.

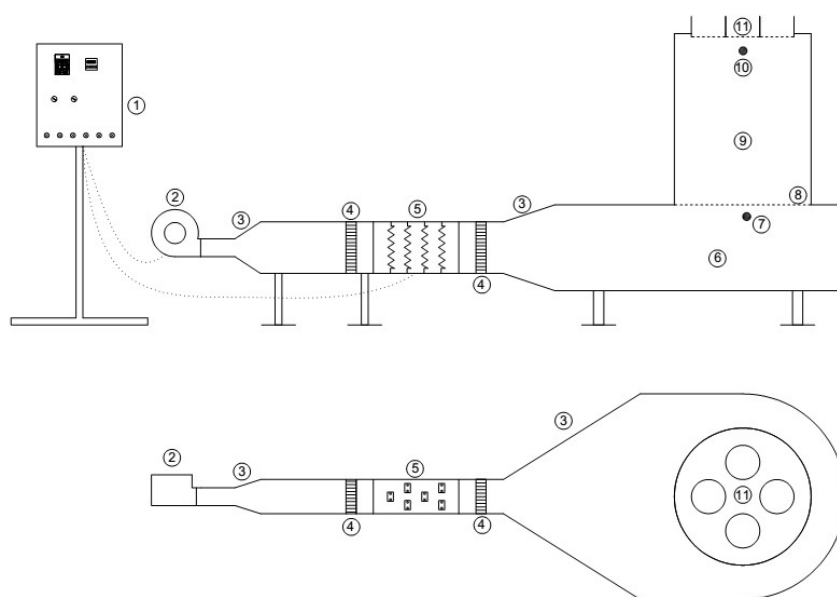


FIGURA 1. Secador experimental utilizado na secagem das sementes de feijão-caupi. (1- Painel de controle de temperatura e fluxo de ar; 2- Ventilador centrífugo; 3- Expansões; 4- Homogeneizadores de ar; 5- Conjunto de resistências elétricas; 6- Plenum; 7- Ponto de medição de temperatura para secagem em camada espessa; 8- Fundo telado para secagem em camada espessa; 9- Leito de secagem em cada espessa; 10- Ponto de medição de temperatura para secagem em camada delgada; 11- Bandejas para secagem em camada delgada). Fonte: Martins (2015).

O leito de secagem em camada delgada foi composto por duas bandejas de 20 cm de diâmetro cada, com fundo telado, onde foram dispostos, aproximadamente, 380 g de feijão-caupi, formando uma camada delgada, conforme exemplificado na Figura 2.



FIGURA 2. Camada delgada de sementes de feijão-caupi disposta nas bandejas do secador.

Anteriormente à secagem, realizou-se a homogeneização e preparação das amostras do produto, sendo novamente realizada a determinação do teor de água, sempre em duplicata (BRASIL, 2009), as quais obtiveram teor de água inicial de $0,475 \pm 0,005$ decimal b.s.

A secagem foi realizada em três diferentes velocidades combinadas com cinco diferentes temperaturas do ar de secagem, com suas respectivas umidades relativas, conforme a Tabela 1, totalizando 15 condições de secagem. As umidades relativas do ar de secagem foram calculadas utilizando-se o software Grapsi, versão 8.1.1, com base em dados das condições de temperatura e umidade relativa ambiente, os quais foram periodicamente monitorados durante a secagem por meio de três termohigrômetros.

TABELA 1. Temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de secagem empregado para a secagem das sementes de feijão-caupi em camada delgada

Velocidade do ar de secagem (m s^{-1})	Temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$)				
	40	50	60	70	80
	Umidade relativa (%)				
0,4	23,7	15,7	10,3	7,1	4,6
1,0	28,1	16,9	8,9	5,2	4,3
1,6	28,0	17,2	11,6	7,6	4,5

A velocidade do ar de secagem foi ajustada pela rotação do motor do ventilador, por meio do inversor de frequência, até atingir a velocidade desejada, sendo averiguada com auxílio de um termo-anemômetro de pás rotativas, da marca Instrutherm, modelo TAD 500, com precisão de $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$.

De posse da massa e do teor de água inicial, acompanhou-se a redução do teor de água das sementes ao longo da secagem pelo método gravimétrico (diferença de massa), utilizando-se uma balança com resolução de 0,01 g. Realizou-se periodicamente, durante a secagem, a determinação da massa das bandejas contendo as amostras do produto, em intervalos determinados pela diferença de massa entre as sucessivas leituras, evitando-se diferenças elevadas do teor de água entre uma leitura e outra. A secagem foi realizada até o produto atingir teor de água de $0,103 \pm 0,003$ decimal b.s.

Os dados do teor de água de equilíbrio, necessários para a determinação da razão de umidade nas condições de temperatura e umidade relativa do ar avaliadas no presente estudo, foram obtidos a partir do trabalho desenvolvido por Ajibola et al. (2003), conforme mostrado a seguir.

$$U_e = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-5,69 \times 10^{-5} (T + 72,10)} \right]^{(2,06)} \quad (1)$$

em que:

- UR: umidade relativa, decimal;
- T: temperatura do ambiente, °C; e
- U_e : umidade de equilíbrio, decimal b.s..

2.2.1. Determinação da razão de umidade e taxa de redução de água

A razão de umidade das sementes de feijão-caupi, nas diferentes condições de secagem, foi determinada por meio da Equação 2.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (2)$$

em que:

- RU: razão de umidade do produto, adimensional;
- U: teor de água do produto em um determinado tempo, decimal b.s.;
- U_e : teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.; e
- U_i : teor de água inicial do produto, decimal b.s.

Os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da secagem das sementes de feijão-caupi estão apresentados na Tabela 2, sendo estes, modelos tradicionalmente utilizados para representar a secagem de diversos tipos de feijões (CORRÊA et al., 2007; RESENDE et al., 2010; CAMICIA et al., 2015), entre outros

produtos agrícolas (RESENDE et al., 2011; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012b e 2013; ALVES et al., 2013; GONELI et al., 2014; RESENDE et al., 2014; COSTA et al., 2015; MARTINS et al., 2015).

TABELA 2. Modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem das sementes de feijão-caupi

Designação do modelo	Equação
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k b \theta)$ (3)
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 \theta) + b \exp(-k_1 \theta)$ (4)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k a \theta)$ (5)
Henderson e Pabis, modificado	$RU = a \exp(-k \theta) + b \exp(-k_0 \theta) + c \exp(-k_1 \theta)$ (6)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k \theta) + c$ (7)
Midilli	$RU = a \exp(-k \theta^n) + b \theta$ (8)
Page	$RU = \exp(-k \theta^n)$ (9)
Thompson	$RU = \exp\{-a - (a^2 + 4 b \theta)^{0,5}\}/2b\}$ (10)

em que:

θ : tempo de secagem, h;

k, k_0 e k_1 : coeficientes dos modelos, h^{-1} ; e

a, b, c e n : coeficientes dos modelos, adimensionais.

A taxa de redução de água do produto durante a secagem foi determinada pela Equação 11, que, segundo Corrêa et al. (2001), refere-se à quantidade de água que determinado produto perde por unidade de matéria seca por unidade tempo.

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{MS (t_i - t_0)} \quad (11)$$

em que:

TRA: taxa de redução de água, $kg \ kg^{-1} \ h^{-1}$;

Ma_0 : massa de água total anterior, kg;

Ma_i : massa de água total atual, kg;

MS: massa de matéria seca, kg;

t_0 : tempo total de secagem anterior, h; e
 t_i : tempo total de secagem atual, h.

2.2.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo do produto foi calculado por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida (Equação 12), a partir dos dados experimentais da secagem das sementes de feijão-caupi. A equação baseia-se na Segunda Lei de Fick, com oito termos para produtos com forma geométrica esférica, desconsiderando a contração volumétrica do produto e considerando a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície da semente, com a premissa de que o mecanismo de transporte da água no interior do produto ocorre por meio da difusão de vapor (MORAIS et al., 2013; CAMICIA et al., 2015).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[-\frac{n_t^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i \cdot \theta}{9} \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (12)$$

em que:

D_i : coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$;
 R_e : raio equivalente, m; e
 n_t : número de termos;

O raio equivalente (R_e), utilizado no modelo de difusão efetivo (Equação 12), pode ser definido como o raio de uma esfera cujo volume é igual ao do produto (CORRÊA et al., 2006; RESENDE et al., 2008; MORAIS et al., 2013; CAMICIA et al., 2015). Esse foi obtido através da medição dos três eixos perpendiculares das sementes de feijão-caupi, comprimento (a), largura (b) e espessura (c), conforme ilustrado na Figura 3, com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

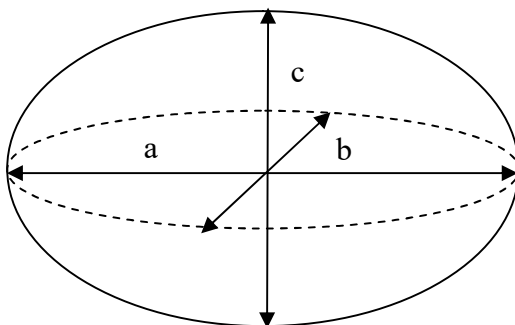


FIGURA 3. Representação dos eixos ortogonais das sementes de feijão-caupi.

em que:

- a: comprimento ou maior eixo, mm;
- b: largura ou eixo médio, mm; e
- c: espessura ou menor eixo, mm.

Foram selecionadas aleatoriamente e medidas 100 sementes de feijão-caupi, sendo, em seguida, determinado o volume individual do produto, considerando-o como um elipsóide escaleno, conforme a Equação 13, proposta Mohsenin (1986).

$$V_g = \frac{\pi (a b c)}{6} = \frac{4 \pi R_e^3}{3} \quad (13)$$

em que:

V_g : volume da semente, mm^3 .

A escolha dessa equação para calcular o volume individual das sementes de feijão-caupi baseou-se em testes preliminares realizados com tolueno, onde o volume real do produto foi comparado ao volume calculado pela equação, apresentando valores próximos. Moraes et al. (2013) e Camicia et al. (2015) também consideraram como elipsóides escalenos, sementes de feijão-caupi, cultivares BRS Maratoã e BRS Guariba, respectivamente.

2.2.3. Influência da temperatura

A avaliação da influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo foi realizada por meio da equação de Arrhenius, descrita na Equação 14.

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (14)$$

em que:

- D_o : fator pré-exponencial, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;
- R : constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;
- T_a : temperatura absoluta, K; e
- E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} .

2.2.4. Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas relacionadas ao processo de secagem das sementes de feijão-caupi, representadas pela entalpia específica, entropia específica e

energia livre de Gibbs, foram determinadas pelo método proposto por Jideani e Mpotokwana (2009), conforme as Equações 15, 16 e 17, respectivamente.

$$\Delta h = E_a - RT_a \quad (15)$$

$$\Delta s = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_a \right) \quad (16)$$

$$\Delta G = \Delta h - T_a \Delta s \quad (17)$$

em que:

- Δh : entalpia específica, $J \text{ mol}^{-1}$;
- Δs : entropia específica, $J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;
- ΔG : energia livre de Gibbs, $J \text{ mol}^{-1}$;
- k_B : constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; e
- h_p : constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$.

2.2.5. Procedimento estatístico

Os dados experimentais de razão de umidade durante a secagem das sementes de feijão-caupi foram submetidos à análise de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton. Ajustaram-se aos dados experimentais, oito modelos matemáticos para expressar a relação entre as variáveis analisadas através do programa computacional Statistica 8.0.

O grau de ajuste de cada modelo matemático, em todas as condições de secagem, foi analisado pelas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2 , em decimal), do erro médio relativo (P, em %) e do erro médio estimado (SE, em decimal). Os valores do erro médio relativo e do erro médio estimado foram calculados conforme descrito pelas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (18)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (19)$$

em que:

- n: número de observações experimentais;

Y: valor observado experimentalmente;
Ŷ: valor calculado pelo modelo; e
GLR: graus de liberdade do modelo.

O coeficiente de difusão efetivo, considerando-se o raio equivalente de 0,0036 m, foi obtido por meio de análise de regressão não linear, utilizando-se o software Statistica 8.0.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Razão de umidade e taxa de redução de água

Estão apresentados na Tabela 3 os valores do erro médio estimado, erro médio relativo e do coeficiente de determinação para os oito modelos ajustados aos dados experimentais da razão de umidade obtidos ao longo da secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi nas diferentes velocidades e temperaturas do ar de secagem.

Observa-se que, em todas as condições de secagem, os modelos matemáticos Aproximação da Difusão (3), Dois Termos (4), Logarítmico (7), Midilli (8), Page (9) e Thompson (10) apresentaram magnitudes de coeficiente de determinação de, no mínimo, 0,98 decimal (Tabela 3). Já para o modelo Exponencial de Dois Termos (5), estes valores mantiveram-se acima de 0,90 decimal, o que, segundo Kashaninejad et al. (2007), indica um ajuste satisfatório desses modelos aos dados experimentais do processo de secagem em estudo.

Entretanto, a utilização do coeficiente de determinação como único critério para a seleção de modelos matemáticos não lineares, para representar o processo de secagem, não é considerada adequada, sendo recomendada a análise conjunta entre outros parâmetros estatísticos (MADAMBA et al., 1996; MOHAPATRA e RAO, 2005).

Ainda na Tabela 3, verifica-se que para a maioria das condições de secagem estudadas, os modelos matemáticos Aproximação da difusão (3), Dois Termos (4), Midilli (8), Page (9) e Thompson (10) apresentaram os menores valores de erro médio estimado que os demais. Esse parâmetro estatístico representa a capacidade que um modelo matemático tem para descrever com fidelidade determinado processo físico, de modo que, quanto mais próximos de zero forem seus valores, maior será o grau de ajuste do modelo aos dados experimentais (DRAPER e SMITH, 1998).

TABELA 3. Erro médio estimado (SE, em decimal), erro médio relativo (P, em %) e coeficiente de determinação (R^2 , em decimal) de diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi em diferentes condições de secagem

Modelos	0,4 m s ⁻¹			1,0 m s ⁻¹			1,6 m s ⁻¹		
	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²
40°C									
(3)	0,0138	4,4830	0,9972	0,0157	5,2091	0,9961	0,0183	5,4037	0,9948
(4)	0,0127	3,9881	0,9977	0,0147	4,7011	0,9967	0,0172	4,8012	0,9956
(5)	0,0673	20,8246	0,9309	0,0707	21,6990	0,9191	0,0776	21,7521	0,9033
(6)	0,0023	0,5359	0,9999	0,0035	0,9882	0,9998	0,0042	0,9773	0,9998
(7)	0,0350	8,1140	0,9819	0,0367	8,3422	0,9788	0,0379	7,5994	0,9777
(8)	0,0047	0,9797	0,9997	0,0052	1,5848	0,9996	0,0054	1,5340	0,9996
(9)	0,0049	0,9967	0,9996	0,0071	2,1285	0,9992	0,0074	1,9719	0,9991
(10)	0,0099	3,3050	0,9985	0,0129	4,5502	0,9973	0,0121	3,7758	0,9976
50°C									
(3)	0,0097	2,4620	0,9984	0,0114	3,1526	0,9977	0,0160	4,3505	0,9955
(4)	0,0092	2,2836	0,9986	0,0110	2,8989	0,9979	0,0153	3,9359	0,9960
(5)	0,0577	14,2628	0,9410	0,0612	16,0436	0,9312	0,0731	19,6786	0,9026
(6)	0,0015	0,3557	0,9999	0,0015	0,3527	0,9999	0,0031	0,6389	0,9998
(7)	0,0310	5,9696	0,9835	0,0316	6,0393	0,9822	0,0349	6,2178	0,9785
(8)	0,0049	0,7739	0,9996	0,0049	1,0200	0,9996	0,0052	1,3675	0,9995
(9)	0,0052	0,9552	0,9995	0,0054	1,1272	0,9995	0,0072	1,7205	0,9991
(10)	0,0097	2,6156	0,9983	0,0106	2,9293	0,9979	0,0122	3,4181	0,9973
60°C									
(3)	0,0066	1,7037	0,9992	0,0093	2,2810	0,9985	0,0130	3,3264	0,9967
(4)	0,0067	1,6880	0,9992	0,0090	2,1630	0,9986	0,0129	3,1816	0,9969
(5)	0,0453	11,1458	0,9633	0,0566	12,9450	0,9420	0,0629	15,5284	0,9213
(6)	0,0890	21,4042	0,8771	0,1583	16,7401	0,6052	0,1708	21,4842	0,5031
(7)	0,0275	5,3127	0,9870	0,0298	5,2610	0,9844	0,0321	5,4892	0,9803
(8)	0,0074	0,8902	0,9991	0,0044	0,8457	0,9997	0,0043	1,0611	0,9997
(9)	0,0075	0,8604	0,9990	0,0063	1,4599	0,9993	0,0061	1,3434	0,9993
(10)	0,0095	2,4328	0,9984	0,0130	3,3191	0,9970	0,0120	2,9839	0,9972
70°C									
(3)	0,0054	1,2836	0,9995	0,0080	1,7704	0,9988	0,0101	2,2950	0,9980
(4)	0,0055	1,2772	0,9995	0,0078	1,6861	0,9989	0,0098	2,2041	0,9982
(5)	0,0350	7,7994	0,9779	0,0484	10,2211	0,9551	0,0543	11,6173	0,9403
(6)	0,0057	1,2772	0,9995	0,0831	8,5072	0,8874	0,0734	7,3978	0,9067
(7)	0,0234	4,1257	0,9904	0,0278	4,4175	0,9857	0,0295	4,5912	0,9830
(8)	0,0065	0,8839	0,9993	0,0042	0,8476	0,9997	0,0042	0,9724	0,9997
(9)	0,0067	0,8514	0,9992	0,0062	1,4130	0,9993	0,0067	1,5457	0,9991
(10)	0,0103	2,5488	0,9981	0,0134	3,2500	0,9966	0,0131	3,2589	0,9965
80°C									
(3)	0,0044	1,0452	0,9997	0,0055	1,3126	0,9994	0,0104	2,4482	0,9979
(4)	0,0044	1,0454	0,9997	0,0055	1,2938	0,9994	0,0104	2,4052	0,9980
(5)	0,0252	5,3712	0,9887	0,0365	7,7106	0,9741	0,0509	11,0439	0,9467
(6)	0,0017	0,1507	0,9999	0,0007	0,0920	0,9999	0,0937	8,4034	0,8495
(7)	0,0201	3,6070	0,9931	0,0236	4,0327	0,9895	0,0291	4,7082	0,9833
(8)	0,0057	0,7437	0,9995	0,0046	0,7471	0,9996	0,0043	0,9685	0,9996
(9)	0,0059	0,7077	0,9994	0,0051	0,9452	0,9995	0,0054	1,0913	0,9994
(10)	0,0094	2,2125	0,9984	0,0111	2,5318	0,9976	0,0120	2,6918	0,9971

Observa-se também que, com exceção dos modelos Exponencial de Dois Termos (5) e Henderson e Pabis, modificado (6), todos os demais modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10% para ambas as condições de secagem (Tabela 3).

Segundo Kashaninejad et al. (2007), o erro médio relativo indica o desvio dos dados experimentais com relação à curva estimada pelo modelo. Por sua vez, Mohapatra e Rao (2005) consideraram que apenas modelos matemáticos que apresentam valores de erro médio relativo inferiores a 10% são adequados para representar o processo de secagem de produtos agrícolas. Desse modo, com base nesses resultados, afirma-se que, apenas os modelos Exponencial de Dois Termos (5) e Henderson e Pabis, modificado (6) foram inadequados para representar o processo de secagem das sementes de feijão-caupi nas condições do presente estudo.

A partir da análise conjunta dos parâmetros estatísticos, verifica-se que apenas os modelos matemáticos Aproximação da Difusão (3), Dois Termos (4), Logarítmico (7), Midilli (8), Page (9) e Thompson (10) poderiam ser utilizados para representar o processo de secagem das sementes de feijão-caupi em todas as condições de secagem empregadas no presente estudo.

Devido a sua simplicidade matemática, por possuir apenas dois coeficientes (k e n), selecionou-se o tradicional modelo de Page (9) para descrever a secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, neste estudo.

O modelo de Page tem sido comumente utilizado por diversos pesquisadores para representar processos de secagem em camada delgada de diferentes produtos agrícolas (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999; DOYMAZ, 2005; CORRÊA et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007; GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2011; SHARADA, 2013; SIQUEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2014; COSTA et al., 2015).

Nas Figuras 4A, 4B e 4C estão apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo de Page, de razão de umidade para a secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi em todas as condições estudadas.

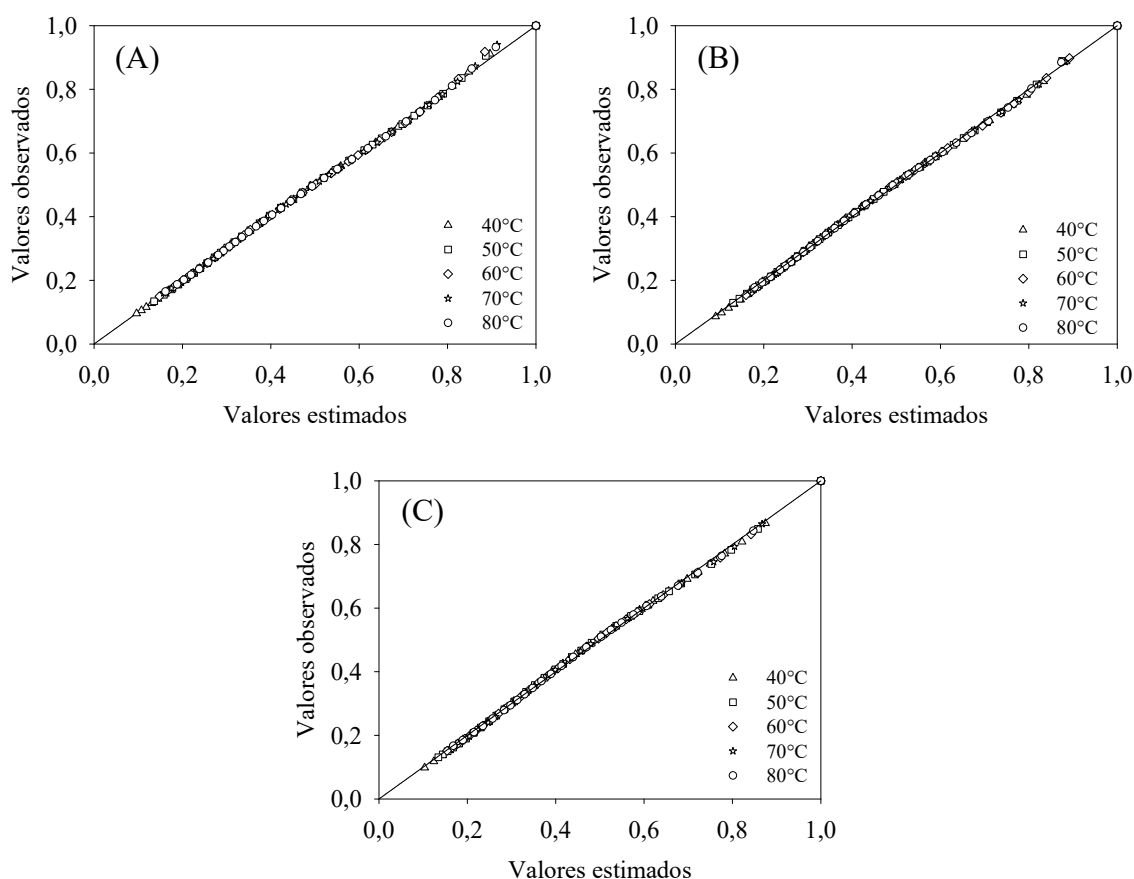


FIGURA 4. Valores de razão de umidade observados e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem das sementes de feijão-caupi, em camada delgada, em diferentes temperaturas do ar de secagem, nas velocidades de 0,4 (A); 1,0 (B); e 1,6 m s⁻¹ (C).

Verifica-se que os dados de razão de umidade observados e estimados, pelo modelo de Page, em todas as condições de secagem, acompanharam uma reta com inclinação de 45° (Figuras 4A a 4C). Assim, reforça-se a aplicabilidade desse modelo para representar o processo de secagem das sementes de feijão-caupi nas condições deste estudo.

Nas Figuras 5, 6 e 7 estão apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi em diferentes temperaturas, nas velocidades do ar de secagem de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente. Verificam-se as proximidades dos valores de razão de umidade observados aos ajustados pelo modelo de Page, indicando o ajuste satisfatório desse modelo a todas as condições de secagem avaliadas neste trabalho.

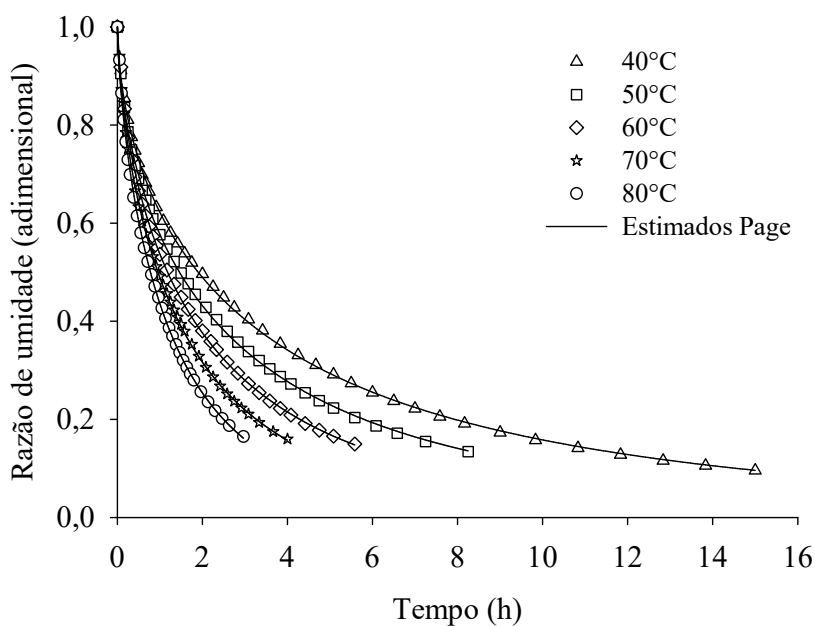


FIGURA 5. Valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem das sementes de feijão-caupi em camada delgada em diferentes temperaturas na velocidade do ar de secagem de $0,4 \text{ m s}^{-1}$.

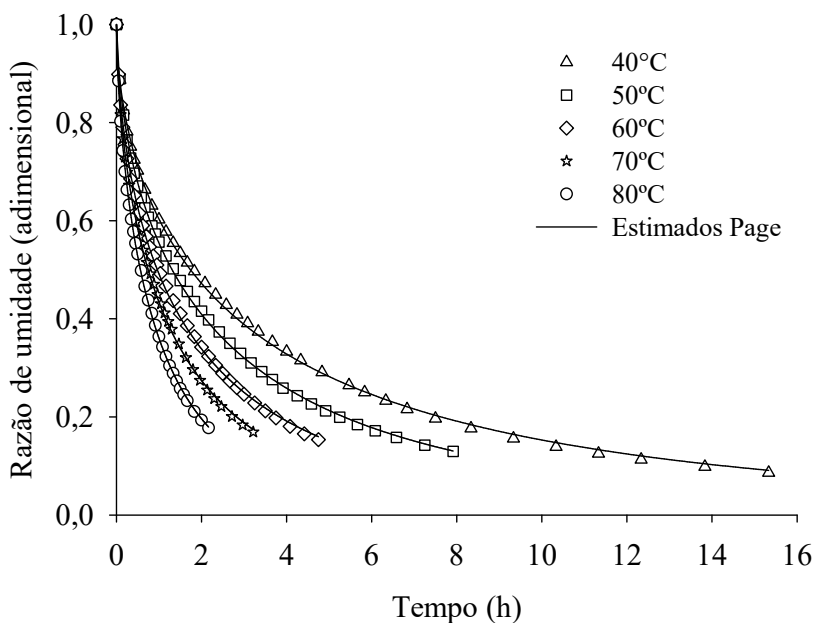


FIGURA 6. Valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem das sementes de feijão-caupi em camada delgada em diferentes temperaturas na velocidade do ar de secagem de $1,0 \text{ m s}^{-1}$.

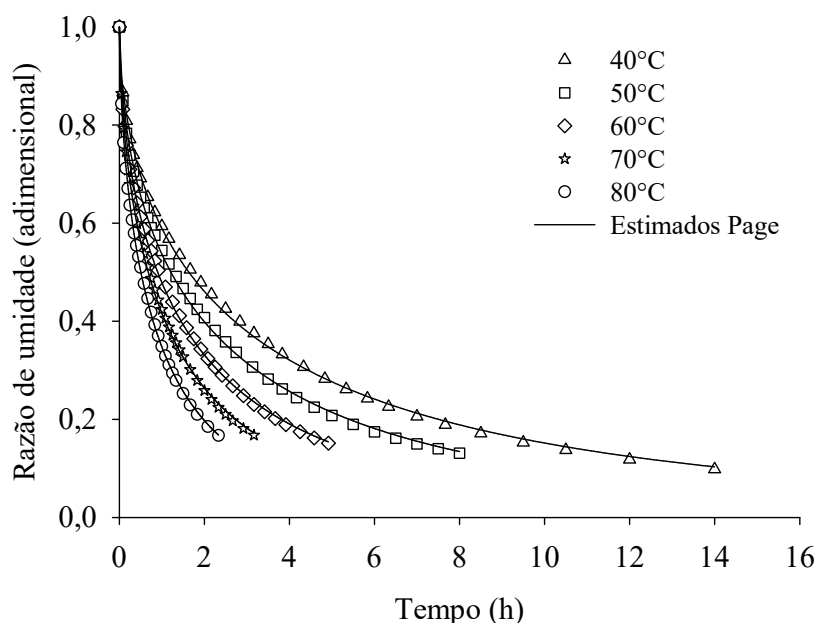


FIGURA 7. Valores de razão de umidade experimentais e estimados, pelo modelo de Page, para a secagem das sementes de feijão-caupi em camada delgada em diferentes temperaturas na velocidade do ar de secagem de $1,6 \text{ m s}^{-1}$.

Analisando as Figuras 5 a 7, constata-se o efeito pronunciado da temperatura do ar de secagem sobre as curvas de secagem das sementes de feijão-caupi. Com o aumento da temperatura, reduziu-se o tempo de secagem, independentemente da velocidade do ar de secagem empregada.

A elevação dessa variável (temperatura) amplia a diferença entre a pressão parcial de vapor do ar de secagem e do produto durante a secagem (SIQUEIRA et al., 2012b). Com isso, há o aumento do potencial de transferência de calor e massa durante tal processo, resultando em acréscimos na taxa de secagem e, conseqüentemente, em decréscimos no tempo de secagem (FERREIRA et al., 2012).

Resultados similares foram obtidos por Morais et al. (2013) e Camicia et al. (2015), também trabalhando com sementes de feijão-caupi, embora as condições de secagem avaliadas por estes autores tenham sido diferentes das do presente estudo. O mesmo foi observado para outros tipos de feijões (CORRÊA et al., 2007; ALMEIDA et al., 2009; RESENDE et al., 2010; DOYMAZ et al., 2015) e em diversos outros produtos agrícolas (DOYMAZ, 2005; KASHANINEJAD et al., 2007; GONELI et al., 2009; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012b; ALVES et al., 2013; SHARADA, 2013; RESENDE et al., 2014; COSTA et al., 2015).

Ressalta-se, porém, que, embora a elevação da temperatura do ar de secagem resulte em menor tempo de secagem, a mesma pode levar a danos térmicos às sementes, resultando no decréscimo do potencial de germinação e vigor, bem como na perda da integridade física dos sistemas de membranas celulares do material. Além disso, o emprego de temperaturas inadequadas para a secagem desse produto agrícola pode favorecer a degradação de seus constituintes químicos durante o armazenamento.

Embora tenha sido menos significativo que a temperatura, observa-se que o aumento da velocidade do ar de secagem também teve influência sobre o comportamento das curvas de secagem do produto, sendo que aumento da temperatura do ar de secagem potencializou o efeito dessa variável (Figuras 5 a 7).

Para uma mesma temperatura, averigua-se que, de modo geral, sementes de feijão-caupi secadas nas velocidades do ar de secagem de 1,0 e 1,6 m s⁻¹ apresentaram menor tempo de secagem em comparação àquelas secadas à velocidade de 0,4 m s⁻¹, com exceção na secagem a 40°C (Figuras 5 a 7), resultado semelhante ao encontrado para nozes de pistache (KASHANINEJAD et al., 2007). Ao secarem sementes de sorgo, Resende et al. (2014) também constataram que a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem resultou em maiores taxas de secagem e, conseqüentemente, em menor tempo de secagem.

Também foi constatado que, o processo de secagem das sementes de feijão-caupi ocorreu em taxas decrescentes, não sendo detectado o período de secagem em taxa constante para todas as condições testadas (Figuras 5 a 7), concordando com o comportamento verificado para a maioria dos produtos agrícolas (DOYMAZ, 2005; CORRÊA et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007; GONELI et al., 2009; CORRÊA et al., 2010; RESENDE et al., 2010; FERREIRA et al., 2012; ALVES et al., 2013; MORAIS et al., 2013; CAMICIA et al., 2015).

Esse fenômeno indica a ocorrência de uma maior resistência do transporte de água do interior do produto para sua superfície em resposta ao recebimento de calor pelo ar de secagem (KASHANINEJAD et al., 2007), assim, controlando seu tempo de secagem (WANG et al., 2007). Desse modo, a velocidade com que as moléculas de água migram do interior do produto para as camadas mais periféricas não acompanha a velocidade com que as mesmas são evaporadas, visto que as resistências às transferências de calor e massa encontram-se, essencialmente, no interior das sementes (CORRÊA et al., 2010; ALVES et al., 2013).

Para Hall (1980), a previsão da taxa de secagem de determinado produto agrícola durante o período decrescente é mais complexa que durante a taxa constante, de vez que, na primeira, devem ser levados em consideração, fatores como o mecanismo de transferência no interior do produto (difusão de calor e massa) e relações de transferências externas.

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes do modelo de Page ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi nas diferentes condições do ar de secagem.

TABELA 4. Magnitudes dos coeficientes k , em h^{-1} , e n , adimensional, do modelo de Page para as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem das sementes de feijão-caupi

Temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$)	Velocidade do ar de secagem ($m\ s^{-1}$)					
	0,4		1,0		1,6	
	k	n	k	n	k	n
40	0,4747	0,5894	0,5055	0,5699	0,5283	0,5525
50	0,5498	0,6111	0,5896	0,5989	0,6218	0,5635
60	0,6216	0,6529	0,7100	0,6091	0,7362	0,5852
70	0,7152	0,6848	0,8345	0,6325	0,8755	0,6056
80	0,8301	0,7229	1,0202	0,6743	1,0560	0,6184

Afonso Júnior e Corrêa (1999) afirmaram que os coeficientes dos modelos matemáticos de secagem em camada delgada de produtos agrícolas são calculados em função de variáveis que influenciam a taxa de dessecção, com destaque para a temperatura do ar de secagem.

O coeficiente k do modelo de Page, o qual reflete o efeito das condições externas de secagem, como a temperatura (CORRÊA et al., 2007; GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2014), teve seus valores acrescidos conforme a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem (Tabela 4). Esses resultados indicaram que a taxa de secagem das sementes de feijão-caupi se elevou conforme o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem. Esse comportamento também foi verificado para sementes de sorgo (Resende et al., 2014), onde as mesmas foram secadas às temperaturas de 40, 50 e 60 $^{\circ}C$ e velocidades do ar de secagem de 0,5 e 1,0 $m\ s^{-1}$.

A elevação do coeficiente k mediante a elevação da temperatura do ar de secagem é um comportamento esperado e tem sido relatada para diferentes produtos agrícolas por vários pesquisadores (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999; GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2010 e 2011; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012b; MORAIS et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013; CAMICIA et al., 2015; COSTA et al., 2015; MARTINS et al., 2015).

O coeficiente k pode ser empregado como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, estando relacionado à difusividade efetiva no período de secagem em taxas decrescentes e à difusão líquida que controla o processo (MADAMBA et al., 1996; BABALIS e BELESSIOTIS, 2004).

O coeficiente n do modelo de Page representa a resistência interna do produto à secagem (CORRÊA et al., 2007; GONELI et al., 2009). Para alguns produtos agrícolas, a elevação da temperatura do ar de secagem promove a redução das magnitudes do coeficiente n (SIQUEIRA et al., 2012b; MORAIS et al., 2013). Isso porque, segundo Siqueira et al. (2012b), com o aumento dessa variável (temperatura), amplia-se a diferença de pressão parcial de vapor entre o ar de secagem e o produto, facilitando a remoção de água do mesmo, de modo que a resistência interna do material é mais facilmente superada. Em outros casos, o coeficiente n não apresenta tendência definida (GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2010 e 2011; COSTA et al., 2015).

Todavia, no presente estudo, com a elevação da temperatura, o coeficiente n teve suas magnitudes acrescidas, independentemente da velocidade do ar de secagem (Tabela 4), concordando com os resultados encontrados por Camicia et al. (2015), também com feijão-caupi, Corrêa et al. (2007), com feijão-comum, Doymaz (2005), com vagens de feijão-comum, Ferreira et al. (2012), com bagaço de uva, e Martins et al. (2015), com folhas de timbó. Entretanto, para uma mesma temperatura, verificou-se que o aumento da velocidade do ar de secagem resultou na redução dos valores desse coeficiente (Tabela 4), concordando com os resultados obtidos por Resende et al. (2014), secando sementes de sorgo em diferentes velocidades do ar de secagem.

Devido à variação, com tendência definida, ocorrida nas magnitudes dos coeficientes k e n do modelo de Page com as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, os mesmos podem ser expressos pelas Equações 20 e 21, respectivamente.

$$k = -0,0851 + 0,0115T + 0,1044V \quad (R^2 = 0,9450; P_{\text{level}} < 0,0001) \quad (20)$$

$$n = 0,5226 + 0,0025T - 0,0559V \quad (R^2 = 0,9350; P_{\text{level}} < 0,0001) \quad (21)$$

em que:

T: temperatura do ar de secagem, °C; e

V: velocidade do ar de secagem, m s⁻¹.

Verificou-se que ambas as equações obtidas para representar a variação dos valores dos coeficientes k e n (Equações 20 e 21), nas diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem, apresentaram satisfatórias magnitudes de coeficiente de determinação (R²) e probabilidades de erro inferiores a 1% (P_{level}).

Inserindo-se as Equações 2, 20 e 21 na Equação 9, do modelo de Page, obtém-se a Equação 22.

$$U = U_e + (U_i - U_e) \exp \left[-(-0,0851 + 0,0115T + 0,1044V) \theta^{(0,5226 + 0,0025T - 0,0559V)} \right] \quad (22)$$

em que:

θ: tempo de secagem, h;

Com esta equação (Equação 22) é possível estimar o teor de água das sementes de feijão-caupi em função do tempo de secagem, temperatura e velocidade do ar de secagem, para uma faixa de temperatura de 40 a 80°C e velocidade de 0,4 a 1,6 m s⁻¹.

Encontram-se nas Figuras 8A, 8B e 8C, as curvas de taxa de redução de água das sementes de feijão-caupi durante o processo de secagem em camada delgada para as diferentes temperaturas do ar de secagem, nas velocidades de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente.

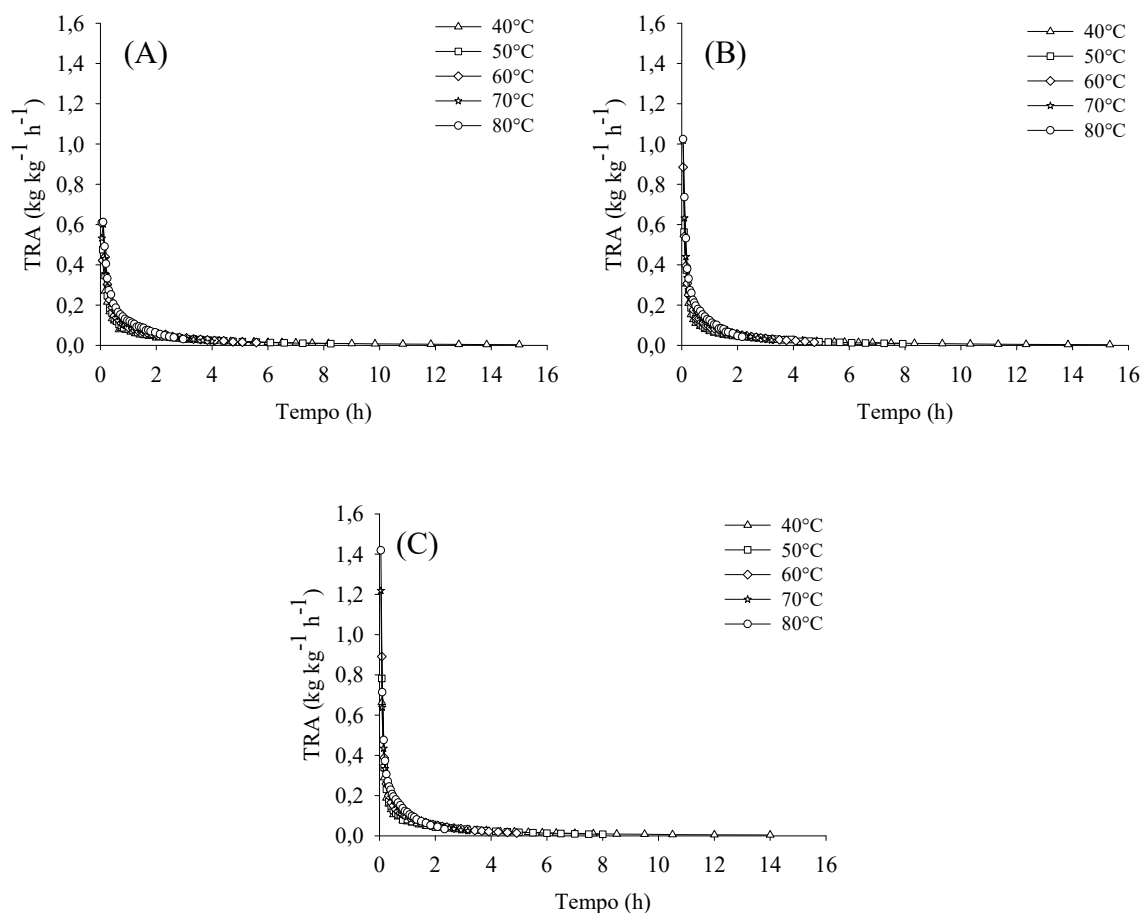


FIGURA 8. Taxa de redução de água para as sementes de feijão-caupi durante processo de secagem em camada delgada em diferentes temperaturas nas velocidades do ar de secagem de 0,4 (A); 1,0 (B) e 1,6 m s^{-1} (C).

Analisando as Figuras 8A a 8C, verifica-se que, independentemente da velocidade empregada, o aumento da temperatura do ar de secagem resultou em maiores valores de taxa de redução de água do produto. Resultados que estão de acordo com os obtidos por Moraes et al. (2013) e Camicia et al. (2015), também para sementes de feijão-caupi, para outros tipos de feijões (CORRÊA et al., 2007; ALMEIDA et al., 2009; RESENDE et al., 2010) e para diferentes produtos agrícolas (DOYMAZ, 2005; KASHANINEJAD et al., 2007; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012).

Constata-se também que, no início do processo de secagem, a remoção de água das sementes de feijão-caupi ocorreu de maneira mais acentuada que no final desse processo, independentemente da temperatura e da velocidade do ar de secagem avaliada (Figuras 8A a 8C), comportamento também verificado para outros produtos agrícolas (DOYMAZ, 2005; ALMEIDA et al., 2009; FERREIRA et al., 2012; DOYMAZ et al., 2015). Para Almeida et al. (2009) e Alves et al. (2013), tal fenômeno ocorre devido ao

fato de que, no final da secagem, há uma maior necessidade de energia para a evaporação da água, de vez que essa se encontra mais fortemente ligada à matéria seca.

Ainda nas Figuras 8A a 8C, verifica-se que para uma mesma temperatura, o aumento da velocidade do ar de secagem resultou em maiores taxas de redução de água do produto no início do processo, de vez que, no final da secagem esse fenômeno não foi constatado.

Provavelmente, isso (Figuras 8A a 8C) se deve ao fato de que, durante o processo de secagem, a água superficial em produtos agrícolas é a primeira a ser evaporada, sendo afetada com maior intensidade pela velocidade do ar de secagem. Todavia, com a remoção da água superficial, a frente de evaporação se desloca gradativamente para as camadas mais interiores do produto, de modo que, o efeito da velocidade do ar de secagem é minimizado, passando a vigorar o processo de difusão líquida (BABALIS et al., 2006), o qual é mais influenciado pela temperatura do ar de secagem (RESENDE et al., 2007). Resultados semelhantes foram obtidos por Kashaninejad et al. (2007), secando nozes de pistache às velocidades de 0,5; 1,0 e 1,5 m s⁻¹.

2.3.2. Coeficiente de difusão efetivo

Encontram-se na Tabela 5, os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos para a secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

TABELA 5. Magnitudes do coeficiente de difusão efetivo (D_i) das sementes de feijão-caupi ajustado as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem em camada delgada

Temperatura do ar	Velocidade do ar		
	0,4 m s ⁻¹	1,0 m s ⁻¹	1,6 m s ⁻¹
($D_i \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)			
40°C	0,5408	0,5802	0,6050
50°C	0,7287	0,8020	0,8321
60°C	0,9327	1,1095	1,1522
70°C	1,1803	1,4629	1,5726
80°C	1,4849	1,9988	2,1371

Observa-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo das sementes de feijão-caupi foram acrescidos conforme o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem, variando na ordem de $0,5408 \times 10^{-10}$ a $2,1371 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para as condições de secagem de 40°C à $0,4 \text{ m s}^{-1}$ a 80°C à $1,6 \text{ m s}^{-1}$ (Tabela 5). Kashaninejad et al. (2007) e Resende et al. (2014) também encontraram para nozes de pistache e sementes sorgo, respectivamente, que, além da elevação da temperatura, o aumento da velocidade do ar de secagem resultou em maiores valores de coeficiente de difusão efetivo.

Os valores do coeficiente de difusão efetivo para a secagem da maioria dos produtos agrícolas estão na ordem de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (MADAMBA et al., 1996), sendo que, a amplitude de valores dessa característica está relacionada às particularidades estruturais, químicas e geométricas apresentadas por cada material biológico (FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; BAPTESTINI et al., 2014; RESENDE et al., 2014). Para o produto secar, a água presente em seu interior deve atravessar camadas de vários tecidos celulares que o compõe, sendo que, de acordo com a composição química desses tecidos, o produto tende a apresentar diferenças com relação ao coeficiente de difusão (RESENDE et al., 2014).

Conforme Oliveira et al. (2012), a difusividade pode ser descrita como a facilidade com que a água é removida de determinado material. A mesma depende da temperatura do ar de secagem empregada, de modo que, quanto maior a magnitude dessa variável, menor será a resistência do produto à remoção de água, elevando a difusividade.

Em adição, Goneli et al. (2009) e Corrêa et al. (2010) defenderam que o aumento do coeficiente de difusão efetivo de produtos agrícolas frente à elevação da temperatura do ar de secagem está ligado à redução da viscosidade da água no interior do produto. Conforme os mesmos autores, a viscosidade é uma medida de resistência desse fluido ao escoamento, de modo que, alterações dessa propriedade resultam em modificações na difusão da água nos capilares do material. Assim, conforme elevação da temperatura do ar de secagem aumenta-se a fluidez da água, favorecendo a movimentação da mesma no produto, resultando no aumento de sua difusividade. De fato, isso foi observado no presente estudo (Tabela 5). Baptestini et al. (2014) ainda sugeriram que o aumento da temperatura eleva o nível de vibrações das moléculas de água no produto, contribuindo para uma difusão mais eficiente.

Por sua vez, o aumento dos valores do coeficiente de difusão efetivo frente à elevação da velocidade do ar de secagem, para uma mesma temperatura (Tabela 5), pode ser atribuído ao fato de que a elevação dessa variável contribui para a rápida remoção da água superficial do produto (MARTINS, 2015). Desse modo, o ar de secagem saturado que envolve o produto é mais rapidamente substituído por ar não saturado, re-estabelecendo a diferença de pressão parcial de vapor entre o ar de secagem e o material, favorecendo a difusividade de água no mesmo.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Morais et al. (2013) e Camicia et al. (2015), onde os autores também constataram o aumento dos valores do coeficiente de difusão efetivo de sementes de feijão-caupi frente ao aumento da temperatura do ar de secagem. Também estão de acordo com os encontrados para sementes de feijão-adzuki (ALMEIDA et al., 2009), feijão-comum (CORRÊA et al., 2006; RESENDE et al., 2007) e diversos outros produtos agrícolas (DOYMAZ, 2005; GELY e GINER, 2007; GONELI et al., 2007 e 2009; CORRÊA et al., 2010; RESENDE et al., 2011; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012a; ALVES et al., 2013; BAPTESTINI et al., 2014; GONELI et al., 2014; COSTA et al., 2015; MARTINS et al., 2015).

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo de diversos produtos agrícolas e a temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (DOYMAZ, 2005; CORRÊA et al., 2006; GELY e GINER, 2007; RESENDE et al., 2007; GONELI et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007; ALMEIDA et al., 2009; GONELI et al., 2009; RESENDE et al., 2011; FERREIRA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012a; ALVES et al., 2013; MORAIS et al., 2013; BAPTESTINI et al., 2014; GONELI et al., 2014; RESENDE et al., 2014; CAMICIA et al., 2015; COSTA et al., 2015).

2.3.3. Influência da temperatura

São apresentados na Figura 9, graficamente, os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T_a$) obtidos para as sementes de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

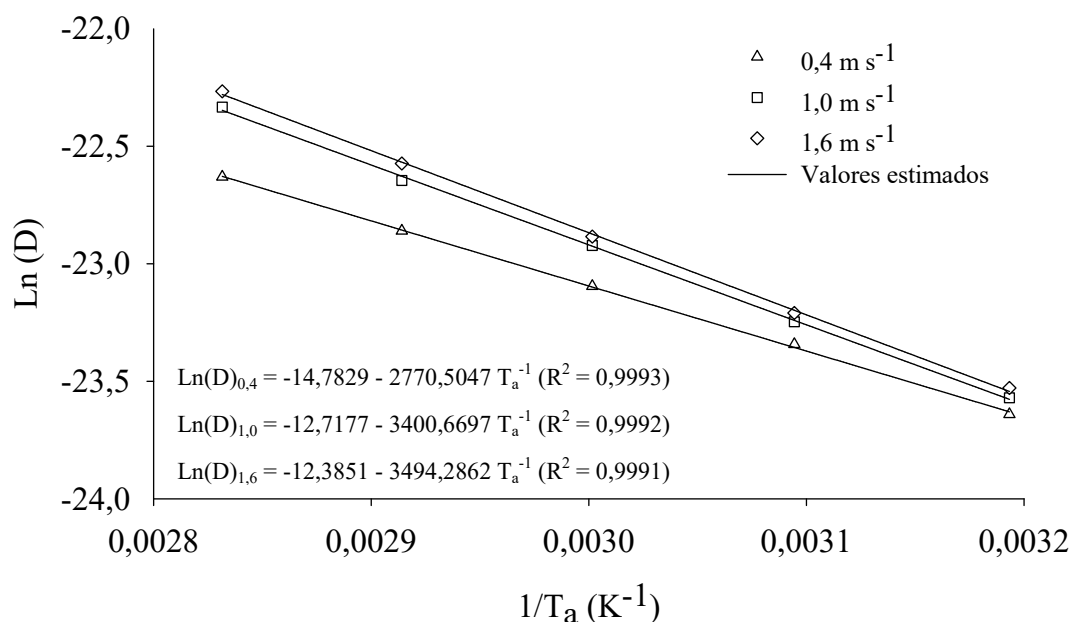


FIGURA 9. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo durante a secagem em camada delgada das sementes de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

Verifica-se na Figura 9 que, os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram linearmente sua dependência com relação à temperatura do ar de secagem, independentemente da velocidade do ar de secagem empregada. A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto a sua inserção com o eixo das coordenadas indica o valor de D_0 (CORRÊA et al., 2006; ALMEIDA et al., 2009; GONELI et al., 2009; ALVES et al., 2013; BAPTESTINI et al., 2014).

As Equações 23, 24 e 25, respectivamente, apresentam os coeficientes da equação de Arrhenius (Equação 14) ajustadas aos coeficientes de difusão efetivo das sementes de feijão-caupi para a secagem nas velocidades de 0,4; 1,0 e 1,6 $m s^{-1}$.

$$D_i = 3,80074 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{23,0340}{R T_a}\right) \quad (23)$$

$$D_i = 2,9976 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{28,2732}{R T_a}\right) \quad (24)$$

$$D_i = 4,18042 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{29,0515}{R T_a}\right) \quad (25)$$

Conforme verificado nas Equações 23, 24 e 25, os valores da energia de ativação para desencadear o processo de secagem das sementes de feijão-caupi, no intervalo de temperatura de 40 a 80°C, para as velocidades do ar de secagem de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente, foram de 23,0340; 28,2732 e 29,0515 kJ mol⁻¹.

Termodinamicamente, a energia de ativação pode ser definida como a facilidade com que as moléculas de água presentes nas camadas mais interiores das sementes superam as barreiras de energia durante a migração dessas para as camadas mais superficiais, sendo que quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto (CORRÊA et al., 2006 e 2007; RESENDE et al., 2007 e 2010; MORAIS et al., 2013). Em outras palavras, menor será a energia requerida para que a transformação física da água ocorra, passando da forma de água livre líquida para vapor (CORRÊA et al., 2010). Da mesma forma, Kashaninejad et al. (2007) e Oliveira et al. (2010) afirmaram que a energia de ativação é a energia que deve ser superada, ou a energia mínima, para que o processo de difusão seja desencadeado no produto.

Verifica-se que, com o aumento da velocidade do ar de secagem, houve também o aumento na magnitude dos valores da energia de ativação (Equações 23 a 25). Esses resultados, provavelmente, se devem ao fato de que a retirada de água do produto em função da velocidade do ar de secagem, neste caso, ser um processo físico, com mesmas faixas de temperatura em estudo para todas as velocidades do ar. Neste caso, o aumento da velocidade do ar provoca um maior arraste de água na forma de vapor presente na superfície do produto, de modo que, quanto maior a velocidade do ar, maior é este arraste, podendo ocorrer também a retirada de água nas primeiras camadas do produto. Quanto maior for a retirada de água na superfície e nas primeiras camadas do produto, maior deverá ser o processo de difusão para reposição desta água perdida, o que pode ser observado pelo aumento dos valores do coeficiente de difusão efetivo (Tabela 5). Assim, quanto maior a difusão de água a ser realizada, maior também será o trabalho a ser realizado, conseqüentemente, maiores também serão as magnitudes da energia requerida para desencadear o processo, representada pelos valores de energia de ativação.

Resultados similares aos encontrados no presente estudo foram obtidos por Resende et al. (2014), trabalhando com sementes de sorgo, onde os autores constataram que elevação da velocidade do ar de secagem, em faixa de temperatura de 40 a 60°C, também resultou em maiores valores de energia de ativação. No trabalho em questão, os

autores verificaram que para a secagem das sementes às velocidades de 0,5 e 1,0 m s⁻¹, os valores de energia de ativação foram de 27,12 e 42,05 kJ mol⁻¹, respectivamente.

Os valores de energia de ativação obtidos no presente estudo estão coerentes com as magnitudes de 27,16 e 35,04 kJ mol⁻¹ encontrados para sementes de feijão-caupi (MORAIS et al., 2013; CAMICIA et al., 2015). Para Zogzas et al. (1996), a energia de ativação para a maioria dos produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110,0 kJ mol⁻¹.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de energia de ativação obtidos para outros tipos de feijões e demais produtos agrícolas por diversos pesquisadores. A amplitude nas magnitudes de energia de ativação verificadas para produtos agrícolas de diferentes espécies e, até mesmo, de genótipos de mesma espécie pode estar relacionada à temperatura empregada para secagem, bem como ao teor inicial de água do produto (COSTA et al., 2015), e, principalmente, aos constituintes químicos do material biológico avaliado (CORRÊA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010).

TABELA 6. Valores de energia de ativação obtidos para diferentes produtos agrícolas por diversos autores

Produto	Ea (kJ mol ⁻¹)	Referência
Feijão-comum	10,08	Corrêa et al. (2007)
Feijão-comum	40,08	Resende et al. (2007)
Feijão-adzuki	31,16	Almeida et al. (2009)
Feijão-adzuki	38,94	Resende et al. (2010)
Soja	27,00	Gely e Giner (2007)
Milho	19,09	Oliveira et al. (2012)
Milho	26,79	Baptestini et al. (2014)
Trigo	42,00	Goneli et al. (2007)
Crambe	21,00	Costa et al. (2015)
Pinhão-manso	15,78	Resende et al. (2011)
Pinhão-manso (frutos e grãos)	23,80	Siqueira et al. (2012a)
Nozes de pistache	30,79	Kashaninejad et al. (2007)
Vagens de feijão-comum	35,43	Doymaz (2005)
Frutos de café	38,39	Corrêa et al. (2010)
Frutos de café	52,89	Alves et al. (2013)
Café descascado (com pergaminho)	55,40	Goneli et al. (2009)
Bagaço de uva fermentado	26,44	Ferreira et al. (2012)
Folhas de erva baleeira	62,89	Goneli et al. (2014)
Folhas de timbó	81,39	Martins et al. (2015)

3.3.4. Propriedades termodinâmicas

Na Tabela 7 são apresentados os valores das propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, para a secagem das sementes de feijão-caupi nas diferentes condições do ar de secagem.

TABELA 7. Propriedades termodinâmicas do processo de secagem dos grãos de feijão-caupi nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem

Velocidade do ar (m s ⁻¹)	Temperatura do ar (°C)	Entalpia específica (J mol ⁻¹)	Entropia específica (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	Energia livre de Gibbs (J mol ⁻¹)
0,4	40	20.430,36	-368,22	135.742,09
	50	20.347,22	-368,48	139.425,60
	60	20.264,08	-368,73	143.111,69
	70	20.180,94	-368,98	146.800,27
	80	20.097,80	-369,22	150.491,27
1,0	40	25.669,56	-351,05	135.604,30
	50	25.586,42	-351,31	139.116,11
	60	25.503,28	-351,56	142.630,50
	70	25.420,14	-351,81	146.147,38
	80	25.337,00	-352,05	149.666,68
1,6	40	26.447,88	-348,28	135.516,67
	50	26.364,74	-348,55	139.000,83
	60	26.281,60	-348,80	142.487,56
	70	26.198,46	-349,05	145.976,79
	80	26.115,32	-349,28	149.468,44

Alterações nas magnitudes da entalpia específica durante o processo de secagem indicam variações na energia decorrente da sorção entre as moléculas de água com os constituintes do produto (CORRÊA et al., 2010). Segundo Goneli et al. (2010), essa característica é um bom parâmetro para estimar a quantidade mínima de energia ou calor requerida para remover certa quantidade de água do produto durante a secagem, bem como para fornecer dados do estado da água no produto. Quanto menor a entalpia específica, menor é a energia requerida para a remoção de água do produto durante a secagem (CORRÊA et al., 2010; GONELI et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010;

OLIVEIRA et al., 2013; MARTINS et al., 2015), diretamente relacionada a maiores temperaturas do ar de secagem.

De fato, isso ocorreu no presente estudo (Tabela 7), onde se observou redução dos valores de entalpia específica com o aumento da temperatura do ar de secagem, independentemente da velocidade do ar empregada. Devido à forte ligação entre a superfície das substâncias adsorventes do produto e as moléculas de água (GONELI et al., 2010), maiores foram as quantidades adicionais de energia para que as mesmas fossem removidas das sementes de feijão-caupi durante a secagem em menores temperaturas. Esse comportamento concorda com o verificado para frutos de café (CORRÊA et al., 2010), sementes de sorgo (RESENDE et al., 2014) e folhas de timbó (MARTINS et al., 2015).

Por outro lado, observa-se que, para uma mesma temperatura, o aumento da velocidade do ar de secagem resultou em acréscimos nos valores dessa propriedade termodinâmica (Tabela 7), concordando com o comportamento verificado para sementes de sorgo (RESENDE et al., 2014). Os valores de entalpia específica obtidos no presente trabalho variaram de 20.097,80 a 26.447,88 J mol⁻¹, para uma faixa de temperatura de 40 a 80°C nas velocidades do ar de secagem de 0,4 a 1,6 m s⁻¹.

Na Tabela 7, constatou-se que a elevação da temperatura do ar de secagem resultou na redução das magnitudes de entropia específica, para todas as velocidades do ar de secagem. Acredita-se que a entropia esteja relacionada com a ligação ou repulsão de forças e o arranjo espacial da relação água-produto, caracterizando, portanto, o grau de ordem ou desordem existente nesse sistema (CORRÊA et al., 2010). Da mesma forma, Goneli et al. (2010) afirmaram que o número de sítios de dessorção disponíveis correspondente para um nível de energia específico é proporcional à entropia diferencial. Para os mesmos autores, essa é uma grandeza termodinâmica que apresenta aumento de seus valores em um processo natural em sistema isolado.

Logo, esse comportamento para a entropia específica (Tabela 7) indica que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior foi o grau de desordem do sistema água-produto, havendo maior excitação e movimentação das moléculas de água, facilitando a remoção de água do material (CORRÊA et al., 2010; GONELI et al., 2010). Resultados similares aos do presente estudo, com relação à temperatura de secagem, também foram verificados para frutos de café (CORRÊA et al., 2010) e folhas de timbó (MARTINS et al., 2015).

Todavia, para uma mesma temperatura, averiguou-se que essa propriedade termodinâmica teve seus valores acrescidos com o aumento da velocidade do ar de secagem (Tabela 7), concordando com o comportamento verificado para sementes de sorgo (RESENDE et al., 2014). Ainda na Tabela 7, verifica-se que os valores de entropia variaram de $-369,22$ a $-348,28 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, para uma faixa de temperatura de 40 a 80°C nas velocidades do ar de secagem de $0,4$ a $1,6 \text{ m s}^{-1}$. Os valores negativos de entropia são atribuídos à existência de adsorção química e/ou modificações estruturais do adsorvente (MOREIRA et al., 2008).

Independentemente da temperatura e da velocidade do ar empregada na secagem do produto, a energia livre de Gibbs apresentou valores positivos (Tabela 7), indicando que o processo não ocorreu espontaneamente (TELIS et al., 2000). O valor positivo é característica de uma reação endergônica, a qual necessita de uma adição de energia oriunda do meio em que o produto está envolvido para que a mesma ocorra (CORRÊA et al., 2010; GONELI et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010; RESENDE et al., 2014). Nayak e Pandey (2000) enfatizaram que, o equilíbrio é atingido quando o gradiente de energia livre de Gibbs for zero.

A energia livre de Gibbs representa um indicativo da afinidade do produto pela água, sendo utilizada como critério para a avaliação da dessorção da água (CORRÊA et al., 2010). Conforme os mesmos autores, mudanças nos valores dessa característica, durante a troca de água entre o produto e meio, indicam a energia necessária para a transferência de moléculas de água em estado gasoso para o sólido ou vice-versa. Assim, os valores de energia livre de Gibbs podem ser considerados como a medida de trabalho feito pelo sistema para tornar os locais de sorção disponíveis para realizar os processos de adsorção ou dessorção (CORRÊA et al., 2010; GONELI et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010).

Ainda na Tabela 7, constatou-se que, com a elevação da temperatura do ar de secagem, para uma mesma velocidade, a energia livre de Gibbs teve seus valores acrescidos, indicando maior trabalho realizado. Esse comportamento concorda com o verificado para frutos de café (CORRÊA et al., 2010), sementes de sorgo (RESENDE et al., 2014) e folhas de timbó (MARTINS et al., 2015), porém, contrário ao encontrado para sementes de duas cultivares de milho-doce (OLIVEIRA et al., 2010).

Entretanto, para uma mesma temperatura, a elevação da velocidade do ar de secagem promoveu reduções nas magnitudes da energia livre de Gibbs nas sementes de feijão-caupi (Tabela 7). Os valores de energia livre de Gibbs para a secagem das

sementes de feijão-caupi variaram, nas condições de secagem avaliadas neste estudo, de 135.516,67 a 150.491,27 J mol⁻¹.

Diferenças de tendência de valores de entalpia específica, entropia específica e energia de Gibbs para produtos de diferentes espécies e, até mesmo, para genótipos de mesma espécie durante a dessecção, podem estar relacionadas às particularidades químicas de cada material, bem como ao teor de água no início do processo (OLIVEIRA et al., 2010).

2.4. CONCLUSÕES

1. Os modelos da Aproximação da Difusão, Dois Termos, Logarítmico, Midilli, Page e Thompson podem ser utilizados para representar o processo de secagem das sementes de feijão-caupi;
2. A elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem resulta no aumento da taxa de redução de água do produto durante a secagem e dos valores do coeficiente de difusão efetivo;
3. A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, apresentando valores de energia de ativação de 23,034; 28,2732 e 29,0515 kJ mol⁻¹, para as velocidades de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente.
4. A entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs são influenciadas pela variação da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, T.S.S. Estrutura de um remanescente de floresta estacional semidecidual ribeirinha da fazenda experimental da Universidade Federal da Grande Dourados, MS. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v.17, n.2, p.71-83, 2013.
- AFONSO JÚNIOR; P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.
- AJIBOLA, O.O.; AVIARA, N.A.; AJETUMOBI, O.E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, London, v.58, p.317-324, 2003.
- ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.2, n.1, p.72-83, 2009.
- ALVES, G.E.; ISQUIERDO, E.P.; BORÉM, F.M.; SIQUEIRA, V.C.; OLIVEIRA, P.D.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, Lavras, v.8, n.2, p.238-247, 2013.
- ARAI, F.K.; GONÇALVES, G.G.G.; PEREIRA, S.B.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A.C.T.; DANIEL, O. Espacialização da precipitação e erosividade na bacia hidrográfica do Rio Dourados - MS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.5, p.922-931, 2010.
- ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.3, p.279-286, 2014.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, London, v.65, n.3, p.449-458, 2004.
- BABALIS, S.J.; PAPANICOLAOU, E.; KYRIAKIS, N.; BELESSIOTIS, V.G. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). **Journal of Food Engineering**, London, v.75, n.2, p.205-214, 2006.
- BAPTESTINI, F.M.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; PAIXÃO, A.A.; MACHADO, P.F. The effect of harvest conditions and drying temperature on drying kinetics of two popcorn genotypes. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.39, p.2964-2970, 2014.

- BARROS, M.A.; ROCHA, M.M.; GOMES, R.L.F.; SILVA, K.J.D.; NEVES, A.C. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.4, p.403-410, 2013.
- BEZERRA, A.A.C.; TÁVORA, F.J.A.F.; FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q. Morfologia e produção de grãos em linhagens modernas de feijão-caupi submetidas a diferentes densidades populacionais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão, v.8, p.85-93, 2008.
- BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n.2, p.331-336, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 395 p.
- CAMICIA, R.G.M.; CHRIST, D.; COELHO, S.R.M.; CAMICIA, R.F.M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.3, p. 206-214, 2015.
- CORRÊA, P.C.; MACHADO, P.F.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.25, n.1, p.134-142, 2001.
- CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M.; GONELI, A.L.D.; CARVALHO, F.M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, v.57, n.5, p.595-601, 2010.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n.2, p.117-126, 2006.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- COSTA, L.M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D.N.; OLIVEIRA, D.E.C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.31, n.2, p.392-403, 2015.
- DOYMAZ, I. Drying behavior of green beans. **Journal of Food Engineering**, London, v.69, p.161-165, 2005.
- DOYMAZ, I.; KIPCAK, A.S.; PISKIN, S. Characteristics of thin-layer infrared drying of green bean. **Czech Journal of Food Sciences**, Praha, v.33, n.1, p.83-90, 2015.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 712p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2. ed., 2006. 412p.

FERREIRA, L.F.D.; PIROZI, M.R.; RAMOS, A.M.; PEREIRA, J.A.M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.6, p.855-862, 2012.

GELY, M.C.; GINER, S.A. Diffusion coefficient relationships during drying of soya bean cultivars. **Biosystems Engineering**, London, v.96, n.2, p.213-222, 2007.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa - Especial Café, n.11, p.64-73, 2009.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the ASABE**, v.53, n.1, p.191-197, 2010.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.27, n.1, p.135-140, 2007.

GONELI, A.L.D.; NASU, A.K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W.D.; SARATH, K.L.L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira de Plantas Medicináveis**, Campinas, v.16, n.2, supl. I, p.434-443, 2014.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980. 382p.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, London, v.92, n.2, p.182-188, 2009.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, London, v.78, n.1, p.98-108, 2007.

MACHADO, C.F.; TEIXEIRA, N.J.P.; FREIRE FILHO, F.R.; ROCHA, M.M.; GOMES, R.L.F. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.39, n.1, p.114-123, 2008.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MARTINS, E.A.S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 2015. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

MARTINS, E.A.S.; LAGE, E.Z.; GONELI, A.L.D.; HARTMANN FILHO, C.P.; LOPES, J.G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar).

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.19, n.3, p.238–244, 2015.

MELO, F.B.; BELTRÃO, N.E.M.; SILVA, P.H.S. Cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.) consorciada com feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) no Semi-Árido. **Documentos 74**, Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. 89p.

MENEGHETTI, V.L.; AOSANI, E.; ROCHA, J.C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C.; POHNDORI, R.S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.10, p.1115-1120, 2012.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v.66, n.4, p.513-518, 2005.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.3, p.455-463, 2013.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, London, v.88, p.514-521, 2008.

MOTA, L.H.S.; SCALON, S.P.Q.; MUSSURY, R.M. Efeito do condicionamento osmótico e sombreamento na germinação e no crescimento inicial das mudas de angico (*Anadenanthera falcata* Benth. Speg.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Campinas, v.15, n.4, p.655-663, 2013.

NAYAK, L.; PANDEY, J.P. Free energy change and monolayer moisture content of paddy and milled rice. **Journal of the Institution of Engineers**, v.80, p.43-45, 2000.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; SOUSA, K.A.; CAMPOS, R.C. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.43, n.1, p.50-56, 2013.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; CAMPOS, R.C.; CHAVES, T.H. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.11, n.2, p.190-201, 2012.

OLIVEIRA, G.H.H.; CORRÊA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; VALENTE, D.S.M.; BOTELHO, F.M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v.45, p.546-554, 2010.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão

(*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; JARÉN, C.; MOURE, A.J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v.5, n.1, p.51-58, 2007.

RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, D.P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; CHAVES, T.H.; FERREIRA, J.; BESSA, V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.32, p.2453-2462, 2014.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V.C.; CHAVES, T.H.C.; FERREIRA, L.U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1123-1135, 2011.

ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modeling versus food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, v.106, p.1428-1437, 2008.

ROCHA, M.M.; CARVALHO, K.J.M.; FREIRE FILHO, F.R.; LOPES, A.C.A.; GOMES, R.L.F.; SOUSA, I.S. Controle genético do comprimento do pedúnculo em feijão-caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.270-275, 2009.

SAGRILO, E.; AZEVEDO, J.N.; SOUSA, V.F.; RAMOS, G.M.; BARBOSA, F.J.V.; ARAÚJO, R.O.C.; SANTOS, J.A.; ARAÚJO, F.S. **Consórcio de mandioca + feijão-caupi adaptado à agricultura familiar**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2003. 19 p. (Embrapa Meio-Norte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 47).

SHARADA, S. Mathematical models for drying behaviour of green beans. **International Journal of Engineering Research and Applications**, Meerut, v.3, n.3, p.845-851, 2013.

SILVA, S.M.S.; MAIA, J.M.; ARAÚJO, Z.B.; FREIRE FILHO, F.R. Composição química de 45 **Genótipos de Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002. 2 p. (Embrapa Meio-Norte. Comunicado Técnico, 149).

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Difusividade efetiva de grãos e frutos de pinhão-mansão. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, suplemento 1, p.2919-2930, 2012a.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, v.59, n.2, p.171-177, 2012b.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Mathematical modelling of the drying of *jatropha* fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.44, n.2, p.278-285, 2013.

TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v.343, p.49-56, 2000.

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Food Research International**, v.40, p.39-46, 2007.

ZORGAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, p.2225-2253, 1996.

CONCLUSÕES GERAIS

A redução do teor de água, dentro da faixa de umidade avaliada, promove alterações em todas as propriedades físicas das sementes de feijão-caupi, sendo que a contração volumétrica unitária é menor que a da massa.

Dentre outros, o modelo de Page representa satisfatoriamente as curvas de secagem do produto, as quais são mais influenciadas pela temperatura que pela velocidade do ar de secagem.

A elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem resulta no aumento da taxa de redução de água do produto e nos valores do coeficiente de difusão efetivo. O aumento da velocidade do ar de secagem promove elevação das magnitudes da energia de ativação. As propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, são influenciadas pela variação da temperatura e da velocidade do ar de secagem.