

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – *CAMPUS* CASCAVEL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DO FEIJÃO-CAUPI E EFEITO SOBRE A
QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES

RAFAELA GREICI DA MOTTA CAMICIA

CASCAVEL

2013

RAFAELA GREICI DA MOTTA CAMICIA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DO FEIJÃO-CAUPI E EFEITO SOBRE A
QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Biológicos e Agroindustriais.

Orientador: Dr. Divair Christ

CASCADEL – PARANÁ – BRASIL

MARÇO - 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste

C19m Camicia, Rafaela Greici da Motta
Modelagem matemática da secagem do feijão caupi e efeito sobre a
qualidade fisiológica das sementes. / Rafaela Greici da Motta Camicia —
Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.
40 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Divair Christ
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola,
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. *Vigna unguiculata* L. Walp. 2. Curvas de secagem. 3. Coeficiente
de difusão. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21. ed. 635.65

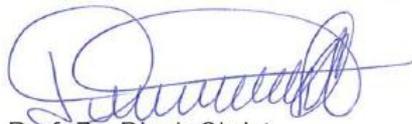
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362¹

¹ Revisor de normas, Língua Portuguesa e Língua inglesa.

RAFAELA GREICI DA MOTTA CAMICIA

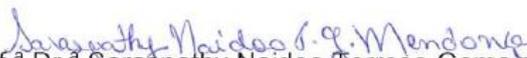
"Modelagem matemática da secagem do feijão caupi e efeito sobre a qualidade fisiológica das sementes "

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação "*Stricto Sensu*" em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Divair Christ

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE



Prof.ª Dr.ª Saraspthy Naidoo Terroso Gama de Mendonça

Secretaria de Educação Profissional e Graduação Tecnológica, UTFPR



Prof.ª Dr.ª Silvia Renata Machado Coelho

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 12 de março de 2013.

BIOGRAFIA

RAFAELA GREICI DA MOTTA CAMICIA

Nascida em 21 de maio de 1987, na cidade de Capanema no estado do Paraná. Filha de Marcos Roberto Camicia e Maristela Fátima da Motta Camicia. Concluiu sua graduação em Matemática no ano de 2008 na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Cascavel, em 2010 encerrou sua especialização em matemática aplicada, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná. É professora de matemática do quadro permanente do magistério no Estado do Paraná. Ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola – PGEAGRI – Nível de Mestrado no ano de 2011.

Ao meu querido avô Albino da Motta (*in memoriam*), responsável por parte da execução deste trabalho.

Dedico...

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Maristela, por seu apoio constante, amor e dedicação em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, pela compreensão nas horas de estudo.

Ao meu namorado Saimon, pela cumplicidade, presença, carinho, paciência e amor dedicados ao longo destes anos.

A minha avó Eva e a minha madrinha Rosicler, por estarem sempre presentes.

A toda a minha família, sem a qual eu não viveria.

Ao meu orientador Dr. Divair Christ, pela oportunidade oferecida, orientação, atenção e paciência que dedicou a mim.

Aos professores da Banca Examinadora, Dra Silvia Renata Machado Coelho e Dra. Saraspathy Naidoo Terroso Gama de Mendonça, pelas oportunas contribuições.

Aos meus colegas de curso, pelos momentos em que aprendemos uns com os outros e crescemos enquanto pessoas e enquanto pesquisadores.

À CAPES, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DO FEIJÃO-CAUPI E EFEITO SOBRE A QUALIDADE FISIOLÓGICA DAS SEMENTES

RESUMO

O feijão-caupi, cultura tradicionalmente cultivada no Nordeste brasileiro, vem se expandindo para diversas regiões do Brasil, principalmente para o Centro-Oeste, nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, em razão da sua ampla adaptabilidade às condições tropicais e ao baixo custo de produção. Após a colheita, a maior parte das sementes possui características inadequadas para o armazenamento, devido principalmente ao alto conteúdo de água na época da colheita. A secagem é o processo mais utilizado para a preservação da qualidade desse produto. A operação consiste na remoção de parte da água contida no feijão recém colhido. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar e modelar as curvas de secagem do feijão-caupi, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, ajustando-se diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais e selecionar aquele que melhor representa o fenômeno, bem como determinar o coeficiente de difusão efetivo e avaliar a qualidade fisiológica das sementes. Foram utilizadas sementes de feijão-caupi das cultivares BRS Guariba e BRS Novaera, colhidas manualmente, com teor de água de 0,21 (b.s) e 0,16 (b.s), respectivamente, secas até o teor 0,11 (b.s.). O processo de secagem foi realizado em secador experimental sob as temperaturas controladas de 30, 40 e 50 °C, e umidade relativa do ar de secagem entre 14 e 59%. O tempo de secagem para as sementes de feijão-caupi (cultivar BRS Guariba) foi de 10,4, 5,6 e 2,1 horas para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente; para a cultivar BRS Novaera a secagem foi de 8,7, 4,7 e 2,0 horas para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente. O modelo matemático de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de ambas as cultivares, apontando que o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre $5,047 \times 10^{-11}$ a $12,011 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para a cultivar BRS Guariba e $2,482 \times 10^{-11}$ a $5,187 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, na cultivar BRS Novaera, para a faixa de temperatura de 30 a 50 °C. A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação de $35,04 \text{ kJ.mol}^{-1}$ e de $29,76 \text{ kJ.mol}^{-1}$ para a difusão líquida no processo de secagem das sementes de feijão-caupi. Após o processo de secagem, as sementes apresentaram percentuais de plântulas normais superiores a 87%; nas diferentes condições de estudo apresentaram baixo vigor, sendo a secagem sob a temperatura de 40 °C a que produziu os resultados mais satisfatórios.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata L. Walp*, curvas de secagem, coeficiente de difusão.

MATHEMATICAL MODELLING OF COWPEA BEAN DRYING AND EFFECT ON THE PHYSIOLOGICAL QUALITY OF SEEDS

ABSTRACT

The cowpea bean, a culture traditionally planted in the Brazilian Northeast, has been expanding to other regions of Brazil, mostly to the Midwest, in the states of Mato Grosso and Mato Grosso do Sul, on account of its wide adaptability to tropical conditions and low production cost. Most of the seeds after harvest do not have appropriate characteristics for the storage, mainly due to high water content at harvest time. Drying is the most widely used process to preserve the quality of the product. The operation consists in removing some water contained in the fresh beans. In this context, the aim of this study was to determine and model the drying curves of cowpea beans at temperatures of 30, 40 and 50 °C, adjusting different mathematical models to experimental data, to select the one that best represents the phenomenon, determine the effective diffusion coefficient, and evaluate the physiological quality of seeds. They were seeds of cowpea bean cultivars BRS Guariba and BRS Novaera, harvested by hand, with water content of 0.21 (bs) and 0.16 (bs) respectively, dried to the level 0.11 (bs). The drying process was carried out in an experimental dryer under controlled temperatures of 30, 40 and 50 °C and relative humidity of the drying air between 14% and 59%. The drying time for the cowpea bean seeds (BRS Guariba cultivar) was 10.4, 5.6 and 2.1 hours at temperatures of 30, 40 and 50 °C respectively. For BRS Novaera, the drying lasted 8.7, 4.7 and 2.0 hours at temperatures of 30, 40 and 50 °C respectively. The mathematical model of Midilli was the one that best adapted to the experimental data for both cultivars. The diffusion coefficient increases with the temperature, with values from 5.047 to 12.011 x 10⁻¹¹ m² s⁻¹, for BRS Guariba, and from 2.482 x 10⁻¹¹ to 5.187 x 10⁻¹¹ m² s⁻¹ for BRS Novaera in the temperature range from 30 to 50 °C. The relation between the effective diffusion coefficient and the drying temperature can be described by the Arrhenius equation, which has activation energy of 35.04 kJ.mol⁻¹ and 29.76 kJ.mol⁻¹ for liquid diffusion in the drying process of cowpea bean seeds. After the drying process, the seeds percentage of normal seedlings were more than 87%, and under the different conditions of study they presented low force, since the drying under a temperature of 40 °C was the one which produced the most satisfactory results.

Keywords: *Vigna unguiculata* L. Walp, drying curves, diffusion coefficient.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo geral	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Feijão-caupi.....	3
3.1.1 Produção e importância socioeconômica	4
3.1.2 Mercado brasileiro	5
3.1.3 Cultivares BRS Guariba e BRS Novaera	6
3.2 Secagem	7
3.3 Modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem	11
3.4 Teoria da difusão.....	14
3.5 Qualidade fisiológica das sementes	16
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Experimento de secagem	20
4.2 Modelagem matemática das curvas de secagem	21
4.3 Determinação do coeficiente de difusão efetivo e energia de ativação	22
4.3.1 Análise estatística	24
4.4 Determinação da qualidade fisiológica das sementes	25
4.4.1 Teste de germinação	25
4.4.2 Emergência em areia.....	25
4.4.3 Índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE)	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 Curvas de secagem.....	27
5.2 Modelagem matemática	28
5.3 Coeficiente de difusão e energia de ativação	33
5.4 Qualidade fisiológica	37
6 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE	49
APÊNDICE A - COEFICIENTES DOS MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modelos de regressão não-linear utilizados para predizer o fenômeno de secagem em camada delgada de sementes de feijão-caupi 22
Tabela 2	Coeficientes de determinação (R^2 , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os doze modelos analisados durante a secagem do feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, em diferentes condições de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) 29
Tabela 3	Coeficientes de determinação (R^2 , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os doze modelos analisados durante a secagem do feijão-caupi, cultivar BRS Novaera, em diferentes condições de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) 30
Tabela 4	Coeficientes do modelo de Midilli durante a secagem do feijão-caupi (cultivar BRS Guariba), para as temperaturas de 30, 40 e 50 $^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar variando de 14% a 59% 32
Tabela 5	Coeficientes do modelo de Midilli durante a secagem do feijão-caupi (cultivar BRS Novaera) para as temperaturas de 30, 40 e 50 $^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar variando de 18% a 56% 32
Tabela 6	Valores da difusividade efetiva (D_{ef}) obtidos para o feijão-caupi, nas duas cultivares em diferentes temperaturas do ar de secagem 33
Tabela 7	Porcentagem de plântulas normais, anormais e sementes mortas e duras do feijão-caupi antes da secagem 38
Tabela 8	Porcentagem de plântulas normais, anormais, e sementes mortas e duras do feijão-caupi, cultivar BRS Novaera após o processo de secagem das sementes nas temperaturas de 30, 40 e 50 $^{\circ}\text{C}$ 38
Tabela 9	Porcentagem de plântulas normais, anormais, e sementes mortas e duras do feijão-caupi, cultivar BRS Guariba após o processo de secagem das sementes nas temperaturas de 30, 40 e 50 $^{\circ}\text{C}$ 39
Tabela 10	Valores médios do índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE) de plântulas do feijão-caupi (BRS Guariba) 39
Tabela 11	Valores médios do índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE) de plântulas de feijão-caupi (BRS Novaera) 40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Curvas típicas de secagem.	10
Figura 2	Secador de camada fixa com dimensões em centímetros.....	21
Figura 3	Representação esquemática das dimensões do grão de feijão-caupi.	23
Figura 4	Curvas experimentais do teor de umidade (decimal) e do tempo de secagem (minutos) para as condições de temperatura (30, 40 e 50 °C), durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Guariba.	27
Figura 5	Curvas experimentais do teor de umidade (decimal) e do tempo de secagem (minutos) para as condições de temperatura (30, 40 e 50 °C), durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Novaera.....	28
Figura 6	Valores experimentais da razão de umidade (RU, decimal) e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do feijão-caupi (BRS - Guariba) nas diferentes temperaturas.	31
Figura 7	Valores experimentais da razão de umidade (RU, decimal) e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do feijão-caupi (BRS - Novaera) nas diferentes temperaturas.	31
Figura 8	Valores do coeficiente de difusão ($m^2 s^{-1}$) obtidos para a secagem do feijão-caupi (BRS Guariba) nas temperaturas de 30, 40 e 50°C.....	34
Figura 9	Valores do coeficiente de difusão ($m^2 s^{-1}$) obtidos para a secagem do feijão-caupi (BRS Novaera) nas temperaturas de 30, 40 e 50°C.	35
Figura 10	Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura do ar de secagem obtido durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Guariba.....	36
Figura 11	Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura do ar de secagem obtido durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Novaera.....	36

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi, cultura tradicionalmente cultivada no Nordeste brasileiro, vem se expandindo para diversas regiões do Brasil, principalmente para o Centro-Oeste, nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, em razão da sua ampla adaptabilidade às condições tropicais e ao seu baixo custo de produção.

Fatores como produção de alta qualidade, valor nutritivo e regularidade da oferta, em termos de quantidade e padronização do produto, têm despertado o interesse de comerciantes, agroindustriais e distribuidores, colaborando para a abertura de importantes mercados, inclusive no exterior.

Em se tratando de qualidade na colheita e armazenamento, é relevante observar o grau de umidade das sementes, que está relacionado ao processo de secagem. Após a colheita, existem inúmeros processos para a conservação da qualidade do feijão e, quando se trata de sementes, a secagem, que tem grande importância nos grãos comuns, pode ser um fator principal ou limitante na manutenção da qualidade das sementes. Por isso, a secagem é o processo mais utilizado para a preservação da qualidade do produto e consiste na remoção de parte da água contida no feijão recém colhido.

Pode-se observar que quanto maior o teor de umidade da semente armazenada maior será o número de fatores adversos à conservação da sua qualidade fisiológica e que a influência da temperatura também é importante, pois, na tecnologia da produção agrícola, a semente de alta qualidade desempenha papel fundamental para a obtenção de altas produtividades.

No estudo da secagem de produtos agrícolas é importante o conhecimento do teor de umidade de equilíbrio do material, pois determinará o teor mínimo de umidade que o material pode atingir, ou seja, o produto só poderá ser seco até a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa pré-estabelecidas. É necessário o conhecimento das relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa do ar, objetivando-se iniciativas e estudos com a finalidade de amenizar estas possíveis alterações (CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2005; RESENDE *et al.*, 2006).

Neste sentido, a modelagem matemática vem sendo empregada de forma satisfatória, descrevendo a cinética da secagem de produtos agrícolas. Para tal, utiliza-se modelo matemático, que representa sua perda de água durante o período de secagem.

Diante da importância social e econômica do feijão-caupi, estabeleceu-se como objetivo para este presente trabalho, estudar a secagem do feijão-caupi.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Modelar e avaliar a secagem do feijão-caupi (*Vigna unguiculata L. Walp.*) sob a influência da variação da temperatura do ar de secagem.

2.2 Objetivos específicos

- Efetuar a secagem do feijão-caupi, cultivares BRS Novaera e BRS Guariba, sob diferentes condições de temperatura (30, 40 e 50 °C) e obter dados quanto à remoção da água em função do tempo;
- Determinar experimentalmente as curvas de secagem das sementes do feijão-caupi e ajustar modelos matemáticos frequentemente utilizados aos dados experimentais;
- Determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação;
- Avaliar a qualidade final do produto, quanto aos atributos fisiológicos: germinação e vigor.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Feijão-caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é uma cultura de origem africana, introduzida no Brasil na segunda metade do século XVI pelos colonizadores portugueses, no estado da Bahia (FREIRE FILHO, 1988). Gandavo (2012) relata que em 1568 já havia indicações da existência de muitos feijões no Brasil e as evidências de que o feijão-caupi era um deles são muito fortes. A partir da Bahia, o caupi foi disseminado por todo o país. No Piauí, um estado que foi colonizado do sertão para o litoral, certamente a comunicação e o comércio com o sertão eram muitos difíceis, encontra-se a citação do cultivo de feijão-caupi nessa região em 1697 (DIAS, 2008), fato que sugere que houve uma intensa disseminação da cultura, principalmente na região Nordeste e daí para todo o país.

É uma planta dicotiledônea, da ordem Fabales, família Fabacea, subfamília Faboideae, tribo Phaseolea, subtribo Phaseolineae, gênero *Vigna*, subgênero *Vigna*, secção *Catyang*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. e subespécie *unguiculata*, subdividida em quatro cultigrupos *Unguiculata*, *Sesquipedalis*, *Biflora* e *Textilis*. No Brasil são cultivados os cultigrupos *Unguiculata*, para a produção de grão seco e feijão-verde e *Sesquipedalis*, comumente chamado de feijão-de-metro, para produção de vagem (FREIRE FILHO *et al.*, 2011).

O feijão-caupi possui, ainda, denominações de feijão-de-corda, feijão-miúdo, feijão-macassar e feijão-fradinho (BORÉM; CARNEIRO, 2006). Constitui-se em um dos principais componentes da dieta alimentar nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, especialmente na zona rural. Pelo seu valor nutritivo, é cultivado, principalmente, para a produção de grãos secos ou verdes, visando ao consumo humano *in natura*, na forma de conserva ou desidratado. Além disso, o feijão-caupi também é utilizado como forragem verde, feno, ensilagem, farinha para alimentação animal e, ainda, como adubação verde e proteção do solo (EMBRAPA MEIO-NORTE, 2011).

É uma das leguminosas de melhor adaptação, sendo versátil e nutritiva entre as espécies cultivadas, e um importante alimento e componente essencial dos sistemas de produção nas regiões secas dos trópicos, cobrindo parte da Ásia, Estados Unidos, Oriente Médio e Américas Central e do Sul (MACHADO *et al.*, 2007).

O feijão-caupi é cultivado, principalmente por pequenos agricultores, nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, onde se constitui numa das principais alternativas sociais e

econômicas de suprimento alimentar e geração de emprego, especialmente para as populações rurais, sendo uma rica fonte proteica vegetal (TORRES; BRINGEL, 2005).

Segundo Embrapa (2011), o feijão-caupi é uma excelente fonte de proteínas (23-25%, em média) e apresenta todos os aminoácidos essenciais, carboidratos (62%, em média), vitaminas e minerais, além de possuir grande quantidade de fibras dietéticas, baixa quantidade de gordura (teor de óleo de 2%, em média) e não conter colesterol.

No Brasil, o caupi vem passando por importantes avanços, tanto do ponto de vista técnico-científico quanto socioeconômico. Particularmente nas regiões Norte e Centro-Oeste, ele tem sido mais divulgado na imprensa e a oferta de suas sementes tem sido objeto de discussões no âmbito de instituições governamentais e financeiras. Na Região Centro-Oeste, principalmente nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, tem havido um crescimento do interesse pelo feijão-caupi, tanto por produtores empresariais quanto por produtores familiares. A partir do Pará e do Mato Grosso, o feijão-caupi está sendo exportado para países africanos e asiáticos (FREIRE FILHO *et al.*, 2008).

3.1.1 Produção e importância socioeconômica

No Brasil, são cultivadas várias espécies de feijão, entretanto, para efeito de regulamento técnico, somente as espécies *Phaseolus vulgaris* (L.) e *Vigna unguiculata* (L.) Walp., feijão-comum e feijão-caupi, respectivamente, são considerados como feijão pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009). Essas duas espécies são as mais importantes social e economicamente no País.

Dados disponíveis na FAO (2009), sobre a produção mundial de feijão-caupi em 2007, indicam que a cultura atingiu 3,6 milhões de toneladas em 12,5 milhões de hectares com 8 milhões na parte oeste e central da África e o restante nas Américas do Sul e Central e na Ásia. Produção esta alcançada em 36 países, destacando-se entre os maiores produtores a Nigéria, o Níger e o Brasil, respectivamente, os quais representam 84,1% da área e 70,9% da produção mundial (FAO, 2009; FROTA; SOARES, ARÊAS, 2008; MORAIS, 2010).

No Brasil, o feijão-caupi é cultivado predominantemente no sertão semiárido da região Nordeste e em pequenas áreas na Amazônia (FREITAS, 2006), o país já se encontra entre os três maiores produtores de feijão-caupi do mundo (FROTA *et al.*, 2009). Em 2007, estimava-se que a área cultivada deste produto no Brasil fosse de, aproximadamente, 1 milhão de hectares, dos quais cerca de 900 mil (90%) estão situados na região Nordeste do Brasil (LIMA *et al.*, 2007).

No ano de 2005, a exportação brasileira chegou a 1.379 toneladas e, em 2006 foram exportadas 5.178 toneladas de grãos; em 2007 o Brasil exportou 30.469 toneladas. O aumento exponencial das exportações de feijão-caupi justifica a necessidade de uma linha de pesquisa específica para atender a essa demanda (DAMASCENO; SILVA, 2011).

Na média do período, 2005 a 2009, a área cultivada com feijão-caupi no Brasil correspondeu a 33,08% da área total de feijão (feijão-comum + feijão-caupi) na região Norte, 60,80% na região Nordeste e 18,05% na região Centro-Oeste. No mesmo período, a produção de feijão-caupi correspondeu a 37,64% na região Norte, 45,67% na região Nordeste e 9,12% na região Centro-Oeste (FREIRE FILHO *et al.*, 2011).

Segundo Freire Filho *et al.* (2011), a área cultivada em hectares (ha) de feijão-caupi foi de 1.279.137 em 2005, 1.323.418 em 2006, 1.418.086 em 2007, 1.543.373 para 2008 e 1.543.373 no ano de 2009, o que corresponde a uma produção de 409.875; 572.183; 416.956; 603.261 e 523.890 toneladas, para os anos de 2005, 2006, 2007, 2008 e 2009, respectivamente. Gerando uma produtividade de 425 kg/ha em 2008 e 339 kg/ha no ano de 2009. Nacionalmente, na média do período de 2005 a 2009, o feijão-caupi contribuiu com 37,53% da área colhida, 15,48% da produção e teve uma produtividade que correspondeu a 42,20% da produtividade nacional.

3.1.2 Mercado brasileiro

No Brasil, o cultivo de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) predomina nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, possivelmente em razão de fatores de ordem climática. O feijão-caupi predomina nas regiões Nordeste e Norte, porém, por ser uma espécie adaptada às condições tropicais e subtropicais, produz bem em todas as regiões do país (ANDRADE *et al.*, 2010).

Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste são cultivadas três safras de feijão-comum (das águas, da seca e de inverno/irrigada), na região Sul, duas safras (das águas e da seca), na região Norte, somente a safra que corresponde à safra das secas, já na região Nordeste, praticamente, só é cultivada a safra das águas, pois a irrigada ainda é muito pequena. A partir do ano de 2006, o déficit de oferta de feijão-caupi na região Norte e Nordeste vem sendo suprido, em parte, pelo feijão-caupi produzido em cultura de safrinha nos cerrados do estado de Mato Grosso (FREIRE FILHO *et al.*, 2011).

Segundo Rocha (2012) e Andrade *et al.* (2010), o feijão-verde é um segmento de mercado muito importante, de grande volume, sobre o qual há poucas informações. Tanto a produção quanto a comercialização ocorrem em torno dos centros urbanos. Em virtude de seu sistema de produção exigir muito trabalho manual, principalmente na colheita e debulha,

é um mercado em que predomina a agricultura familiar. As vagens verdes e os grãos verdes, a granel, são comercializados em feiras livres; já os grãos verdes embalados são comercializados em mercearias e supermercados. É um produto que apresenta preços atrativos e constitui uma importante opção de negócio, inclusive com possibilidade de avanços em seu processamento industrial, como enlatamento, resfriamento e congelamento.

O segmento de mercado referente a sementes, de acordo com Freire Filho *et al.* (2011), na região Norte, a demanda potencial estimada é de 1.364 toneladas, na região Nordeste, é de 32.241 toneladas e na região Centro-Oeste, considerando a área plantada em 2009, é de 4.955 toneladas. O mesmo relata ainda que, o uso de sementes certificada ainda é muito baixo, com exceção da região Centro-Oeste, que utiliza semente certificada em quase toda a área plantada.

3.1.3 Cultivares BRS Guariba e BRS Novaera

Devido à grande ascensão do caupi, tem crescido a demanda por novas cultivares que apresentem porte moderno, maturidade mais uniforme e com grãos de ampla aceitação comercial (FREIRE FILHO *et al.*, 2007). Destacam-se duas cultivares: BRS Novaera e BRS Guariba.

O cruzamento que deu origem a cultivar BRS Novaera foi realizado no ano 2000. A cultivar BRS Novaera tem porte semiereto, apresenta ramos laterais curtos e tem a inserção das vagens um pouco acima do nível da folhagem. A cor das vagens na maturidade fisiológica e de colheita é amarelo-clara, podendo apresentar pigmentação roxa nos lados das vagens. Tem grãos de cor branca, grandes, reniformes e com tegumento levemente enrugado e anel do hilo marrom (FREIRE FILHO *et al.*, 2008).

Segundo Freire Filho *et al.* (2008), a cultivar BRS Novaera é recomendada para cultivo nos estados do Pará, Roraima, Amapá, Rondônia e Amazonas, na Região Norte; no Maranhão e Rio Grande do Norte, na Região Nordeste; e no Mato Grosso do Sul, na região Centro-Oeste. É uma cultivar precoce, e suas vagens alcançam a maturidade em período concentrado.

A BRS Novaera é adequada à agricultura familiar e empresarial. Permite a colheita manual, semimecanizada e totalmente mecanizada, com grãos de alto valor comercial. Possui grãos bem formados, no padrão de preferência de uma grande faixa de consumidores no mercado nacional e internacional (FREIRE FILHO *et al.*, 2007).

Recomenda-se que seja feito um bom preparo do solo e que a correção da acidez e a adubação sejam definidas com base nos resultados da análise de fertilidade do solo. O

espaçamento recomendado é de 0,4 a 0,5 m x 0,1 m, com 8 a 10 plantas por metro linear, o que resulta em 200 a 250 mil plantas por hectare. Para obter essa população de plantas, são necessários de 40 a 50 kg de sementes por hectare (EMBRAPA, 2011).

A cultivar BRS Guariba foi obtida do cruzamento da linhagem IT85F-2687, do *International Institute of Tropical Agriculture* – IITA, em Ibadan, Nigéria, com a linhagem TE87-98-8G, do Programa de Melhoramento da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, PI. É um cultivar com ciclo em torno de 70 dias, com planta de porte semiereto, grão de coloração branca, com teor de proteína na faixa de 22% e de tamanho médio (massa média de 100 grãos na faixa de 19,5 g). É recomendada para condições de alta tecnologia (solo corrigido e adubado com base no resultado da análise química do solo) (RAMOS, 2011).

A cultivar BRS Guariba é recomendada para o cultivo de sequeiro nos estados do Piauí e Maranhão. Para a correção de acidez do solo e adubação devem ser seguidas as recomendações da análise de fertilidade do solo. Recomenda-se o espaçamento entre 0,5 e 0,6 m entre linhas com 10 a 12 plantas por metro linear, respectivamente, de modo a se obter em torno de 200 mil plantas por hectare, utilizando-se 39 kg de sementes por hectare. Deve-se realizar o controle de ervas daninhas, pragas e doenças, sempre que for necessário. A colheita deve ser feita imediatamente após a secagem das vagens para que seja obtida boa qualidade dos grãos (FREIRE FILHO *et al.*, 2004).

As melhores temperaturas para o bom desenvolvimento do feijão-caupi estão entre 18 e 34 °C. A cultura exige o mínimo de 300 mm de chuvas ao longo do ciclo. A falta de água, perto do florescimento, pode causar diminuição no crescimento vegetativo, limitando a produção (EMBRAPA MEIO-NORTE, 2011).

3.2 Secagem

Apesar dos avanços, a produção interna de feijão sofre perdas consideráveis até chegar ao consumidor. A maior parte dos grãos após a colheita possui características inadequadas para o armazenamento, em razão, principalmente, do alto conteúdo de água na época da colheita (FARONI *et al.*, 2006).

Vários processos de conservação da qualidade do feijão podem ser usados durante seu cultivo e colheita. Dentre estes, a secagem é o processo mais utilizado para a preservação da qualidade desse produto. A operação consiste na remoção de parte da água contida no feijão recém colhido, sendo que o baixo teor de água permite o armazenamento do produto por um período de tempo superior ao que normalmente ocorreria com um produto mais úmido (SOUZA *et al.*, 2005).

A produção de grãos ou sementes com elevada qualidade requer, entre outras recomendações, que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos, doenças e microrganismos. Desta maneira e devido ao teor de umidade elevado por ocasião da colheita, a secagem constitui uma das operações de importância primordial, entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal (AFONSO JUNIOR; CORREA, 1999). Esta etapa tem papel significativo nas perdas de sementes, uma vez que seu manejo incorreto ocasiona a deterioração do produto ao longo do armazenamento (FARONI *et al.*, 2006).

A secagem dos produtos é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (CORRÊA *et al.*, 2007). A conservação pela secagem baseia-se no fato de que os microrganismos, as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de certa quantidade de água para suas atividades (MORAIS, 2010).

O processo de secagem de produtos agrícolas tem por finalidade a determinação das taxas de secagem do produto utilizando-se para a coleta de dados o registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante a remoção de água (MONTE *et al.*, 2008). É a eliminação da água do material através da evaporação. Existem dois métodos de secagem: a natural, feita pelo sol ou vento (método mais antigo); a artificial, que necessita de fornecimento de energia, diferente da solar (PARK; YADO; BROD, 2001).

Segundo Durigan, Faleiros e Sanches (1978), as características ideais para o feijão são: tamanho do grão, cor, aparência, propriedades e tempo de cozimento, aspectos de hidratação, conteúdo proteico etc. Neste aspecto a secagem e a armazenagem estão intimamente ligadas à qualidade do produto final.

A tecnologia da conservação de alimentos consiste, atualmente, na aplicação de alguns princípios físicos ou químicos tais como: uso de altas e baixas temperaturas, eliminação de água, adição de substâncias químicas, uso de certas radiações e filtração. Resultam desses processos transformações físico-químicas capazes de prolongar a vida do alimento. Assim, alguns processos tecnológicos da conservação de alimentos conhecidos atualmente podem ser aplicados, como: altas temperaturas, baixas temperaturas, eliminação de água (desidratação osmótica, secagem, liofilização, concentração e prensagem), aditivos químicos e irradiação (PARK *et al.*, 2011).

Segundo Park *et al.* (2011), o objetivo máximo de qualquer processamento é a manutenção das qualidades do produto. Portanto, para o dimensionamento e controle ótimos de processos e equipamentos de processamentos é necessário quantificar a deterioração de qualidade do material que está sendo manuseado. A qualidade de um

produto depende do uso final que será feito desse produto, o que, por sua vez, dirá quais as características que deverão ser conservadas. Assim, é o critério de conservação de qualidade que dita o tipo de processo de secagem e armazenamento.

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem (MARTINAZZO *et al.*, 2007b).

O fenômeno de redução do teor de água de grãos é complexo e envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (RESENDE *et al.*, 2008).

O processo de secagem de um produto, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente. Durante o período de velocidade constante a temperatura do produto se mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam, ou seja, o ar recupera, sob a forma de vapor, o que perdeu sob a forma de calor. No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação. Desta forma a transferência de calor do ar para o produto não é compensada pela transferência do vapor de água e, conseqüentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem. O processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos (Figura 1) (PARK; YADO; BROD, 2001).

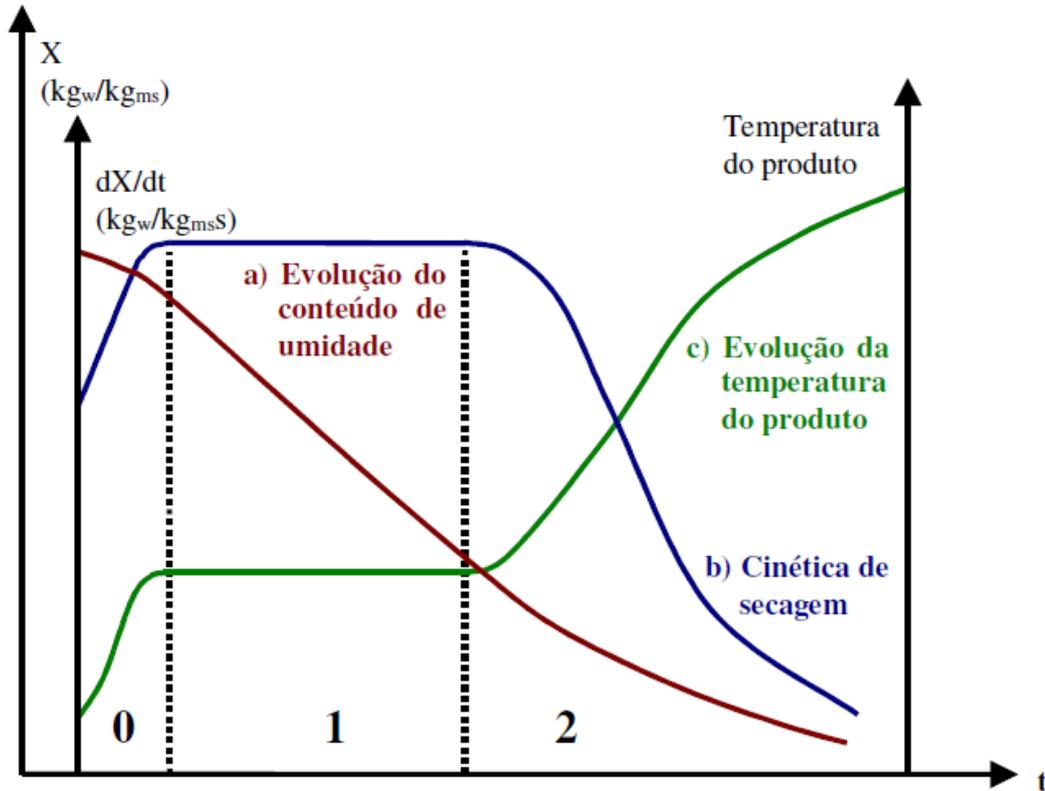


Figura 1 Curvas típicas de secagem.

Fonte: Park *et al.* (2007).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, conteúdo de umidade do produto em base seca, em relação à evolução do tempo de secagem t , isto é, é a curva obtida pesando-se o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem. A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo t , isto é, é a curva obtida diferenciando-se a curva (a). A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem, variação da temperatura do produto, em relação à evolução do tempo t , isto é, é a curva obtida medindo-se a temperatura do produto durante a secagem (PARK *et al.*, 2007).

O primeiro período (período 0) representa o início da secagem, no qual ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água). O segundo período (período 1) caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente, sendo a velocidade de secagem constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante. Nos grãos é difícil a existência deste período, pois as

condições operacionais de secagem são tais que as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material (PARK; YADO; BROD, 2001).

No terceiro período (período 2), a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa. O fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio, em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado. O terceiro período é quase sempre o único observado para a secagem de grãos (MORAIS, 2010; PARK *et al.*, 2007, PARK; YADO; BROD, 2001).

3.3 Modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem

Durante o armazenamento do feijão podem ocorrer mudanças físicas, químicas e microbiológicas que, dependendo da interação entre estes fatores e o ambiente, podem ocasionar perdas na sua qualidade. Assim, faz-se necessário o conhecimento das relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa do ar, objetivando iniciativas e estudos com a finalidade de amenizar estas possíveis alterações (CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2005; RESENDE *et al.*, 2006).

No desenvolvimento e no aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, são de importância fundamental a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto, durante a remoção de água (BERBET *et al.* 1995). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (SANTOS *et al.* 2013).

Segundo Vilela e Artur (2008), as informações contidas nas curvas de secagem são de importância fundamental, com elas pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos e, com o tempo necessário para a produção, estima-se o gasto energético que refletirá no custo de processamento que, por sua vez, influenciará no preço final do produto. O dimensionamento do equipamento pode determinar as condições de operação para secagem e, com isto, a seleção de trocadores de calor, ventiladores e outros.

As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Nesse sentido,

diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (CORRÊA *et al.*, 2007; RESENDE *et al.*, 2008, RESENDE; FERREIRA, ALMEIDA, 2010).

Os parâmetros que influenciam na taxa de secagem são: temperatura e umidade relativa do ar ambiente; temperatura e fluxo do ar de secagem; teor de água inicial; histórico do produto; fluxo do produto no secador (ANDRADE *et al.*, 2006).

Os modelos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente, dependendo do período considerado (MORAIS, 2010). Na literatura encontram-se vários modelos que foram propostos para analisar a secagem de produtos higroscópicos: teóricos, semiempíricos e empíricos (MARTINAZZO *et al.*, 2007a).

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), os métodos teóricos normalmente consideram as condições externas, como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. Dependendo do material que se está secando, a umidade pode movimentar-se no seu interior por diferentes mecanismos. Em produtos capilares porosos, tais como os produtos agrícolas, os possíveis mecanismos de transporte de umidade são: movimento do líquido em razão das diferentes concentrações de umidade - difusão de líquido; movimento do líquido devido a forças superficiais - difusão capilar; movimento de líquido em razão da difusão de umidade nas superfícies dos poros - difusão na superfície; movimento de líquido em razão da diferença de pressão total - fluxo hidrodinâmico; movimento de vapor em razão ao gradiente de pressão parcial de vapor - difusão de vapor; movimento de vapor em razão da diferença de temperatura - difusão térmica. A teoria da difusão líquida tem sido amplamente empregada na área de secagem, embora existam algumas suposições a serem consideradas para sua aplicação, como: redução do volume desprezada, não existência do efeito de capilaridade, equilíbrio térmico instantâneo com o ar e os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, admitidos como desprezíveis.

Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK; VOHNIKOZA; BROD, 2002, ROMERO-PEÑA; KIECKBUSCH, 2003).

Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, as relações semiempíricas e empíricas têm-se mostrado como as melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Estes modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (CORRÊA *et al.*, 2007, RESENDE *et al.*, 2008, RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010).

Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm qualquer significado físico. Dessa forma, os modelos empíricos não fornecem uma perspectiva dos importantes processos que ocorrem durante a secagem, embora em alguns casos possam descrever as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (KEEY, 1972). Entre esses modelos, têm-se o de Thompson, Peart e Foster (1968) e o de Wang e Singh (1978), tradicionalmente utilizados nos estudos de secagem de produtos agrícolas e de alimentos.

Segundo Martinazzo *et al.* (2007a), muita ênfase se tem dado ao desenvolvimento de modelos semiteóricos, que concorrem para que haja harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. Os modelos semiteóricos são geralmente derivados da simplificação da segunda lei de Fick ou de modificações de modelos simplificados (MORAIS, 2010). Oferecem, frequentemente, facilidade de uso, sendo válidos somente para as faixas de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e teor de água em que eles foram obtidos, não fornecendo, entretanto, indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos, considerando, ainda, que todo processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002). Entre os modelos semiteóricos, os modelos de Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Logarítmico, Aproximação da difusão, Dois termos e Exponencial de dois termos têm sido frequentemente utilizados para a modelagem matemática da cinética de secagem de produtos agrícolas (CORRÊA *et al.*, 2007, PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

Durante a modelagem e simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, diversos autores correlacionaram satisfatoriamente o coeficiente de difusão com os coeficientes dos modelos ajustados aos parâmetros de secagem, principalmente temperatura, umidade relativa e vazão do ar (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999, ANDRADE *et al.*, 2006, CORRÊA *et al.*, 2007, MARTINAZZO *et al.*, 2007a, RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010).

Diversos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de identificar as características de alguns produtos agrícolas durante a secagem, como: folhas de manjeriço (REIS *et al.*, 2011), feijão-caupi (MORAIS, 2010), feijão-adzuki (RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010), feijão preto (AFONSO JUNIOR; CORRÊA, 1999), feijão vermelho (CORRÊA *et al.*,

2007, RESENDE *et al.*, 2008), folhas de capim-limão (MARTINAZZO *et al.*, 2007b), arroz em casca (RESENDE *et al.*, 2005), dentre outros.

3.4 Teoria da difusão

Diversas teorias e fórmulas empíricas foram desenvolvidas para prever a taxa de secagem: Teoria da difusão líquida, Teoria capilar, Teoria de Luikov, Teoria de Philip e de Vries, Teoria de Krisher-Berger e Pei e Teoria da condensação-evaporação. As duas primeiras são básicas e fundamentam as outras (MARTINAZZO *et al.*, 2007a; PARK; VOHNIKOZA; BROD, 2002).

Os modelos de secagem baseados na teoria da difusão líquida têm merecido atenção especial por parte dos pesquisadores. Estes modelos assumem que não há influência da capilaridade e desprezam os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada a dificuldade de se quantificarem esses múltiplos efeitos na massa de produto e, também, por considerarem que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (GONELLI *et al.*, 2007).

O mecanismo pelo qual ocorre a difusão da água nos produtos agrícolas é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Na literatura sobre secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, são encontradas grandes variações nos valores do coeficiente de difusividade, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e a metodologia utilizada para sua obtenção (RESENDE *et al.*, 2005).

Dentre os modelos teóricos que são aplicados ao processo de secagem, o modelo da difusão é o mais intensamente investigado (MORAIS, 2010). Este modelo é aplicado em processos de secagem de um sólido à taxa decrescente, considerando, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick (PARK; VOHNIKOZA; BROD, 2002). A difusão ocorre nos sólidos de estrutura fina e nos capilares, poros e nos pequenos orifícios cheios de vapor. Contudo, a teoria de difusão não considera o encolhimento, o endurecimento da casca e as isotermas de sorção (COSTA *et al.*, 2011).

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), na teoria da difusão líquida a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração. O coeficiente de difusão é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água e o seu valor

é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais (MARTINAZZO *et al.*, 2007b). Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material (COSTA *et al.*, 2011).

A Equação 01 mostra a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos grãos e considerando a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do grão (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Esta equação apresenta-se na forma de uma série infinita, podendo o número finito de termos (n), no truncamento, determinar a precisão dos resultados (MORAIS, 2010).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{r^2} \quad (01)$$

em que:

D_{ef} = coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$);

r = raio equivalente, m;

n = número de termos.

Independentemente dos trabalhos sobre secagem, Crank (1975) calculou um grande número de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água. Para o caso de secagem em sistemas de coordenadas cartesianas, com direção unidirecional em uma placa de espessura 2L.

Os modelos que empregam a teoria da difusão podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura. Nesse caso, há que se considerar que o valor médio da razão de umidade (RU), quer seja determinado pela solução de uma série truncada quer seja por integração de um conjunto de pontos discretos, distribuídos na matriz do produto, representa a taxa de secagem de um sólido isolado, seja no formato de placa plana, no formato cilíndrico ou esférico (CRANK, 1975).

Costa *et al.* (2011), na determinação do coeficiente efetivo de sementes de crambe, obtiveram que o coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura,

apresentando valores de $0,88 \times 10^{-11}$; $1,99 \times 10^{-11}$; $2,90 \times 10^{-11}$; $3,48 \times 10^{-11}$ e $5,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para as temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente, durante a secagem do crambe. Os autores afirmam que a relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem de $37,07 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

Silva *et al.* (2008), com o trabalho sobre a determinação da difusividade e da energia de ativação para o feijão-macassar, variedade sempre-verde, chegaram à conclusão de que o modelo esférico estabelecido para os grãos foi satisfatório, resultando em difusividade efetiva que variou de $7,13 \times 10^{-11}$ até $14,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C e em energia de ativação igual a $26,9 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Gonelli *et al.* (2007) estudaram a difusão de umidade em grãos de trigo e relatam que o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura do ar, apresentando valores de $8,6775 \times 10^{-11}$ e $42,8743 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de temperatura entre 25 e 50 °C, e energia de ativação para a difusão líquida nos grãos de trigo de $42,00 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

3.5 Qualidade fisiológica das sementes

A utilização de sementes de alta qualidade constitui a base para elevação da produtividade agrícola. O componente fisiológico da qualidade de sementes tem sido objeto de inúmeras pesquisas, em decorrência das mesmas estarem sujeitas a uma série de mudanças degenerativas após a sua maturidade (TUNES *et al.*, 2011).

A qualidade fisiológica está relacionada com a capacidade da semente em desempenhar suas funções vitais, caracterizando-se pela longevidade, germinação e vigor. Portanto, os efeitos sobre a qualidade, geralmente, são traduzidos pelo decréscimo na porcentagem de germinação, aumento de plântulas anormais e redução do vigor das plântulas (TOLEDO *et al.*, 2009). Este vigor pode ser definido como a soma de atributos que conferem à semente o potencial para germinar e emergir e resultar em plântulas normais sob grande diversidade de condições ambientais (TUNES *et al.*, 2011).

A qualidade fisiológica tem sido um dos aspectos mais pesquisados nos últimos anos, em decorrência das sementes estarem sujeitas a uma série de mudanças degenerativas de origem bioquímica, fisiológica e física após a sua maturação, que estão associadas com a redução do vigor (ALIZAGA *et al.*, 1990). Segundo Queiroga e Duran (2010), a avaliação do potencial fisiológico é fator importante nos programas de controle de qualidade que buscam garantir desempenho satisfatório das sementes, tendo relação direta com o estabelecimento da cultura.

De acordo com Ambrosano *et al.* (1999), este item diz respeito a atributos intrínsecos à semente, os quais determinam a sua capacidade de germinar e emergir rapidamente, para que a cultura se estabeleça e produza plantas vigorosas, mesmo quando as condições no campo não sejam as mais adequadas. Essa capacidade fisiológica de desempenho da semente é modificada continuamente com o tempo, sendo tais modificações conhecidas como processo de deterioração. Este é irreversível, culminando com a morte da semente.

A semente de feijão, quando é debulhada com umidade acima de 18%, apresenta risco de perder-se por amassamento e, quando muito seca, está sujeita ao quebramento. O ideal seria proceder à colheita da semente na maturação fisiológica, sendo, no entanto, necessário reduzir rapidamente a umidade a níveis compatíveis com a operação e a preservação da qualidade da semente. Entretanto, sabe-se que a água prende-se às partículas do sistema biocoloidal com diferentes níveis de energia, de sorte que sua remoção é complexa, já visto que os mecanismos de retenção da umidade na semente são mais eficientes do que os do meio ambiente pelos quais é retirada. A utilização de dessecantes, que preservem o rendimento, a germinação e o vigor da semente, é uma técnica bastante interessante na solução deste problema (DOMINGOS; SILVA; SILVA, 1997).

Germinação de sementes em teste de laboratório é a emergência e desenvolvimento das estruturas essenciais do embrião. O objetivo deste teste é determinar o potencial máximo de germinação de um lote de sementes, o qual pode ser usado para comparar a qualidade de diferentes lotes e também estimar o valor para semeadura em campo (BRASIL, 2009).

Os resultados do teste de germinação devem refletir a capacidade das sementes originarem plântulas normais, sob condições controladas e favoráveis de ambiente (NOVEMBRE; MARCOS FILHO, 1999).

De acordo com Coimbra *et al.* (2007), os resultados do teste de germinação são utilizados para comparar a qualidade fisiológica de lotes, determinar a taxa de semeadura e servir como parâmetro de comercialização de sementes. O teste é realizado seguindo-se uma metodologia padronizada, sob condições artificiais e controladas de laboratório, altamente favoráveis, para que se obtenha a maior porcentagem de germinação no menor tempo possível.

Tecnologistas e produtores de sementes têm buscado métodos mais confiáveis e passíveis de serem padronizados, para determinar o real potencial de desempenho de um lote de sementes, tendo os testes de vigor despertado grande interesse, no sentido de se identificar possíveis diferenças na qualidade fisiológica entre lotes cujas sementes apresentam poder germinativo semelhante (AGUERO; VIEIRA; BITTENCOURT, 1997).

O vigor de sementes é a soma de atributos que confere à semente o potencial para germinar, emergir e resultar rapidamente em plântulas normais, sob ampla diversidade de condições ambientais (SOUZA *et al.*, 2005).

Segundo Aguero, Vieira e Bittencourt (1997), a produção de sementes de alta qualidade representa uma das principais prioridades para o sucesso da cultura de feijão, uma vez que, de seu uso depende a obtenção de estandes que garantam uma população de plantas necessária à obtenção de rendimentos máximos.

A utilização de sementes de boa qualidade fisiológica é fator primordial no estabelecimento de qualquer lavoura. Sementes de baixa qualidade, isto é, com potencial de germinação e vigor reduzidos, originam lavouras com baixa população de plantas e, em consequência disto, acarretam sérios prejuízos econômicos (DUTRA *et al.*, 2007).

Christ (1996) relata que os parâmetros associados à redução da qualidade das sementes durante o processo de secagem são: temperatura, umidade relativa e vazão do ar, tempo de permanência do produto na câmara de secagem e os teores de umidade inicial e final. Neste sentido, altas temperaturas tendem a reduzir a germinação, alterando suas características químicas, físicas e biológicas, causando danos irreversíveis à sua qualidade.

O teor de água final para o armazenamento é o valor máximo com o qual o produto pode ser armazenado por períodos pré-determinados, sem que ocorram deteriorações. Este teor de água varia conforme o tipo de produto. Os grãos, de modo geral, têm sua faixa ótima de teores de água para armazenamento compreendida entre 11 e 13% (ANDRADE *et al.*, 2006). Para a secagem de sementes em geral, é recomendado que a temperatura não ultrapasse 40 °C (DIAS *et al.*, 2012). Vicenzi (2005), especificamente para as sementes de soja, relatou as mesmas conclusões.

Segundo Dias *et al.* (2012), o vigor de sementes de feijão-caupi, independente do material usado, foi comprometido pelo uso de temperaturas de secagem superiores a 40 °C. O aumento da temperatura de secagem de sementes de feijão-caupi, compromete a qualidade fisiológica quantificada pelo vigor. Para Faroni *et al.* (2006), o aumento da temperatura do ar de secagem não tem efeito sobre a classificação por tamanho e nem sobre a coloração das sementes de feijão, mas reduz a qualidade fisiológica das sementes ao longo do armazenamento.

Afonso Júnior e Corrêa (2000), avaliando os efeitos da combinação de diversas temperaturas de secagem e diferentes teores de água sobre a germinação e o vigor, verificaram que a qualidade fisiológica está inversamente relacionadas com a temperatura do ar de secagem e com o teor de água do produto na colheita. Podendo estes efeitos serem verificados imediatamente após a secagem, como depois de seis meses de armazenamento.

Afonso Júnior (1997), estudando os efeitos do processo de secagem na qualidade de sementes de feijão da variedade Ouro Negro 1992, verificou que a temperatura do ar de secagem e os conteúdos de água inicial e final dos grãos, afetam a germinação e o vigor das sementes. Este efeito foi menos acentuado em grãos colhidos com 17,1% b.u. de conteúdo de água inicial.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Armazenagem e Protótipos de Instalações de Secagem (LAPIS) do curso de graduação em Engenharia Agrícola, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Cascavel, durante o ano de 2012.

Para o cultivo foram utilizadas sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.), cultivar BRS Guariba (planta de porte semiereto, grãos de coloração branca, tamanho médio com ciclo em torno de 70 dias) e BRS Novaera (grãos de coloração branca, grandes, reniformes e com tegumento enrugado e anel do hilo marrom, além de ser uma cultivar precoce), cedidas pela Embrapa Meio-Norte e pelas Sementes Tomazetti. O plantio realizou-se no dia 15 de janeiro de 2012 no município de Capanema, situado na região sudoeste do Paraná, com tratos culturais adequados e adubação orgânica.

A cultura foi monitorada durante seu ciclo para que se obtivesse o produto com qualidade, a fim de evitar influência sobre os resultados da pesquisa. A colheita da cultivar BRS Novaera realizou-se no dia primeiro de abril de 2012, enquanto que a BRS Guariba foi colhida no dia dezesseis de abril de 2012. Em ambos os casos, a colheita foi realizada arrancando-se as vagens e estas debulhadas manualmente. As amostras foram submetidas ao processo de limpeza e armazenadas em sacos plásticos, os quais foram lacrados e acondicionados em refrigerador a uma temperatura de 4 °C até o seu uso para o experimento. Antes de cada experimento de secagem, as amostras foram retiradas do refrigerador e mantidas em temperatura ambiente, visando homogeneizar a temperatura.

Para determinação do teor de água inicial foram utilizadas subamostras de cada variedade com, aproximadamente, 5 g cada. As sementes foram dispostas em cápsulas de alumínio e levadas a estufa à temperatura de 105 °C \pm 3, durante 24 horas, com três repetições. Após, foram acondicionadas no dessecador por, aproximadamente, 20 minutos. Em seguida, as subamostras foram pesadas, para cálculo do grau de umidade. Os resultados foram expressos em porcentagem, conforme Regras para análises de sementes (BRASIL, 2009).

4.1 Experimento de secagem

A secagem do produto realizou-se sob as temperaturas de 30, 40 e 50 °C \pm 1°, utilizando-se um secador de camada fixa em escala de laboratório, com um ventilador de

fluxo axial (Figura 1). O aquecimento do ar ambiente, para realização da secagem, foi proporcionado por três resistores com potência de 1000 watts cada.

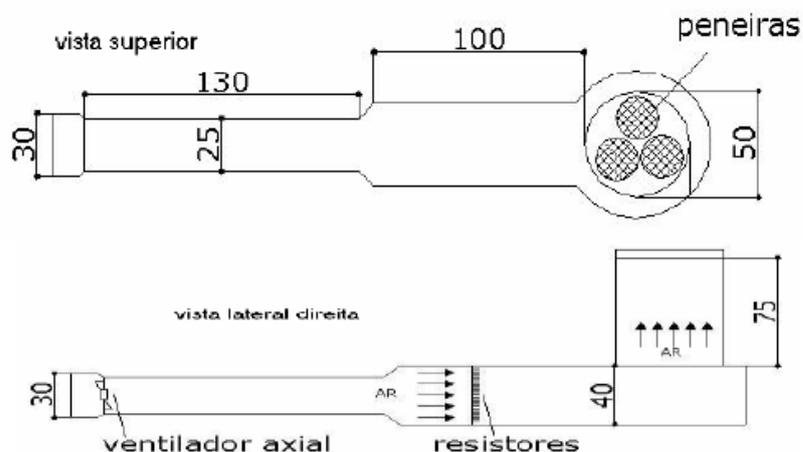


Figura 2 Secador de camada fixa com dimensões em centímetros.

Fonte: Gasparin (2012).

As amostras foram colocadas em três bandejas de metal perfuradas para permitir a passagem do ar através da massa do produto, o fluxo de ar foi perpendicular às sementes de feijão. A velocidade do ar foi monitorada com o auxílio de um anemômetro e a umidade relativa do ar por meio de um psicrômetro. Durante a secagem, o monitoramento da temperatura de secagem foi através de termopares do tipo T.

Durante o processo foram realizadas pesagens sucessivas das bandejas com as amostras, com o objetivo de calcular o teor de umidade e determinar o conteúdo adimensional de umidade. Para realizar estas pesagens fez-se uso de uma balança analítica, com precisão de 0,001g. A secagem das sementes prosseguiu até que o produto atingisse o teor de umidade de aproximadamente 11% b.u..

4.2 Modelagem matemática das curvas de secagem

Aos dados experimentais da secagem do feijão foram ajustados os modelos matemáticos da Tabela 1. Para o ajuste dos dados utilizou-se o *software* STATISTICA 7.0.

Para a determinação das razões de umidade (RU) do feijão-caupi, nas diferentes condições de secagem, foi utilizada a Equação 02.

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

em que:

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

U_i = teor de água inicial do produto, decimal b.s;

U_e = teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

Tabela 1 Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem em camada delgada de sementes de feijão-caupi

Designação do Modelo	Modelo	Equação
Modelo de Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	(3)
Modelo de Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	(4)
Modelo Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	(5)
Modelo de Wang e Sing	$RU = 1 + a.t + b.t^2$	(6)
Modelo de Thompson	$RU = a.\ln(RU) + b.[\ln(RU)]^2$	(7)
Modelo de Page modificado	$RU = \exp[-(k.t)^n]$	(8)
Modelo de Newton	$RU = \exp(-k.t)$	(9)
Modelo de logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	(10)
Modelo de Henderson & Pabis modificado	$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_0.t) + c.\exp(-k_1.t)$	(11)
Modelo de exponencial de dois termos	$RU = a.\exp(-k.t) + (1 - a)\exp(-k.a.t)$	(12)
Modelo de dois termos	$RU = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$	(13)
Modelo de aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1 - a)\exp(-k.b.t)$	(14)

Fonte: Madamba, Driscoll e Buckle (1996); Doymaz, (2004); Mohapatra e Rao (2005).

em que:

RU = razão de umidade do produto, adimensional;

t = tempo de secagem, h;

k, k₀, k₁ = coeficientes de secagem, h⁻¹,

a, b, c, n = coeficientes dos modelos.

4.3 Determinação do coeficiente de difusão efetivo e energia de ativação

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 15, aos dados experimentais da secagem das sementes de feijão-caupi. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick,

considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos grãos e considerando a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do grão (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{r^2} \quad (15)$$

em que:

Def = coeficiente de difusão efetivo ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

r = raio equivalente, m;

n = número de termos.

O raio equivalente, utilizado no modelo da difusão, é definido como o raio de uma esfera cujo volume é igual ao do grão, sendo determinado por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura) (Figura 3), com auxílio de um paquímetro digital (precisão de 0,001 mm). O volume de cada grão (V), considerado como um esferoide triaxial, foi obtido utilizando-se a seguinte expressão (MORAIS, 2010; COSTA *et al.*, 2011):

$$V = \frac{\pi(a.b.c)}{6} = \frac{4\pi.r^3}{3} \quad (16)$$

em que:

a = maior eixo do grão (comprimento), mm;

b = eixo médio do grão (largura), mm;

c = menor eixo do grão (espessura), mm.

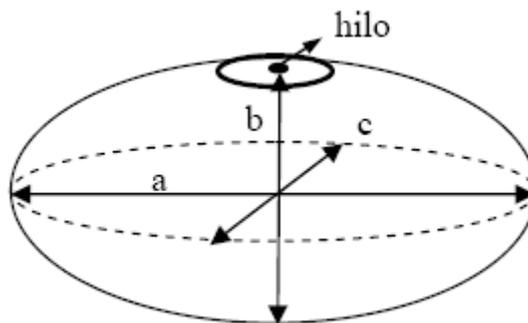


Figura 3 Representação esquemática das dimensões do grão de feijão-caupi.

Fonte: Gonelli *et al.* (2007).

A variação do coeficiente de difusão, de acordo com a temperatura de secagem, foi analisada utilizando-se a relação de Arrhenius (Equação 17).

$$D = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (17)$$

em que:

A = constante (m^2s^{-1});

E = energia de ativação (J mol^{-1});

R = constante universal dos gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

T = temperatura absoluta (K).

4.3.1 Análise estatística

Para o ajuste dos modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais, realizou-se a análise de regressão não linear pelo método Quasi – Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 7.0.

Na seleção do melhor modelo foram considerados: a significância do coeficiente de regressão pelo teste t, adotando-se o nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado (R^2), o erro médio relativo (P) e o erro médio estimado (SE) (RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010, MORAIS, 2010, CORRÊA *et al.*, 2007).

O erro médio relativo e o erro médio estimado foram calculados conforme descrito nas Equações 18 e 19 (CORRÊA *et al.*, 2007, RESENDE *et al.*, 2005, RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010):

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

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (19)$$

em que:

Y = valor observado experimentalmente;

Y_0 = valor calculado pelo modelo;

GLR = graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Sendo que para um bom ajuste matemático o erro médio relativo deve ser inferior a 10% e o erro médio estimado deve estar o mais próximo possível de zero (MADAMBÁ; DRISCOLL; BUCKLE, 1996).

4.4 Determinação da qualidade fisiológica das sementes

Após a secagem, as sementes foram avaliadas no Laboratório de Avaliação de Sementes e Plantas (LASP), quanto à qualidade fisiológica, sendo submetidas aos testes de germinação e vigor.

4.4.1 Teste de germinação

No teste de germinação foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes para cada cultivar, semeadas em rolos de papel toalha tipo Germitest, as quais foram dispostas com o auxílio de um contador de sementes, umedecidas com água destilada, o equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco e colocadas em germinador a 25 °C. A avaliação realizou-se ao nono dia após a semeadura, segundo critérios estabelecidos pelas Regras para Análise de Sementes – RAS (BRASIL, 2009), após esta etapa determinou-se a porcentagem de plântulas normais, anormais, duras e mortas.

4.4.2 Emergência em areia

O teste de emergência em areia foi realizado em caixas plásticas de 3,5 L, com 50 sementes em cada caixa, sendo, quatro caixas para cada variedade. A umidade foi controlada com irrigações quando necessário. A contagem das plântulas foi realizada diariamente a partir do 4º dia após a semeadura, estendendo-se até atingir o número constante de plantas, o que se deu aos 9 dias após semeadura, e os resultados foram expressos em porcentagem (NAKAGAWA, 1999). Com estes dados foi determinado o índice de velocidade de emergência (IVE) e a velocidade de emergência (VE).

4.4.3 Índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE)

O IVE foi realizado em conjunto com a emergência em areia, conforme Maguire (1962), em que foi realizada contagem diária das plantas emergidas, a partir do quarto dia após sementeira, sendo obtido de acordo com a expressão:

$$IVE = (G_1/N_1) + (G_2/N_2) + \dots + (G_n/N_n)$$

em que:

IVE = índice de velocidade de emergência;

G_i = número de plântulas normais computadas nas contagens, com $i = 1, 2, \dots, n$;

N = número de dias da sementeira a 1^a, 2^a... enésima avaliação.

Após a determinação do IVE, pode-se obter a velocidade de emergência (VE), utilizando-se a fórmula proposta por Edmond e Drapala (1958):

$$VE = [(N_1 G_1) + (N_2 G_2) + \dots + (N_n G_n)] / (G_1 + G_2 + \dots + G_n)$$

em que:

VE = velocidade de emergência (dias);

G = número de plântulas emergidas observadas em cada contagem;

N = número de dias da sementeira a cada contagem.

Para esta etapa do experimento inicialmente foi avaliada a variabilidade dos dados com teste de normalidade e homogeneidade das variâncias. Os dados que não apresentaram distribuição normal dos erros, foram transformados em $\text{arc sen } \sqrt{\frac{x}{100}}$, de

acordo com Banzatto e Kronka (1989).

Após os testes da qualidade fisiológica foi realizada a análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Para estas análises utilizou-se o *software* Sisvar®, versão 5.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curvas de secagem

No processo de determinação das curvas de secagem a umidade inicial das sementes de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp.) para a cultivar BRS Guariba foi de $21 \pm 0,2\%$ b.s e para a BRS Novaera de $16 \pm 0,2\%$ b.s.

Nas figuras 4 e 5 são apresentados os valores do teor de água durante a secagem do feijão-caupi para as cultivares BRS Guariba e BRS Novaera, nas temperaturas em estudo, com umidade relativa do ar de secagem de 59%, 35% e 14%, respectivamente, para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, durante o processo de dessorção de água da cultivar BRS Guariba. Para a cultivar BRS Novaera a umidade relativa do ar de secagem foi de 56%, 37% e 18%, respectivamente, para as temperatura de 30, 40 e 50 °C.

Na Figura 4 observa-se que o tempo necessário para a cultivar BRS Guariba atingir o teor de água de, aproximadamente 0,11 (b.s.), foi de 10,4; 5,6; e 2,1 horas (620, 335, 125 minutos), para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente. Na Figura 5, observa-se que, para as sementes de feijão-caupi (cultivar BRS Novaera) atingirem o teor de água de, aproximadamente 0,11 (b.s.), o tempo foi de 8,7; 4,7 e 2,0 horas (520, 280, 120 minutos), para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente.

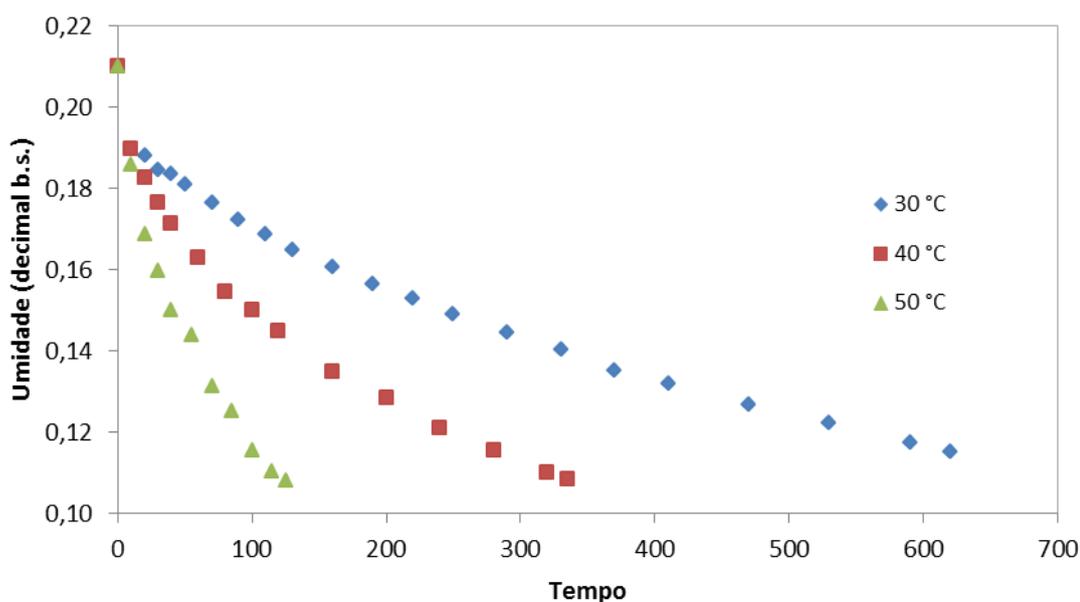


Figura 4 Curvas experimentais do teor de umidade (decimal) e do tempo de secagem (minutos) para as condições de temperatura (30, 40 e 50 °C), durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Guariba.

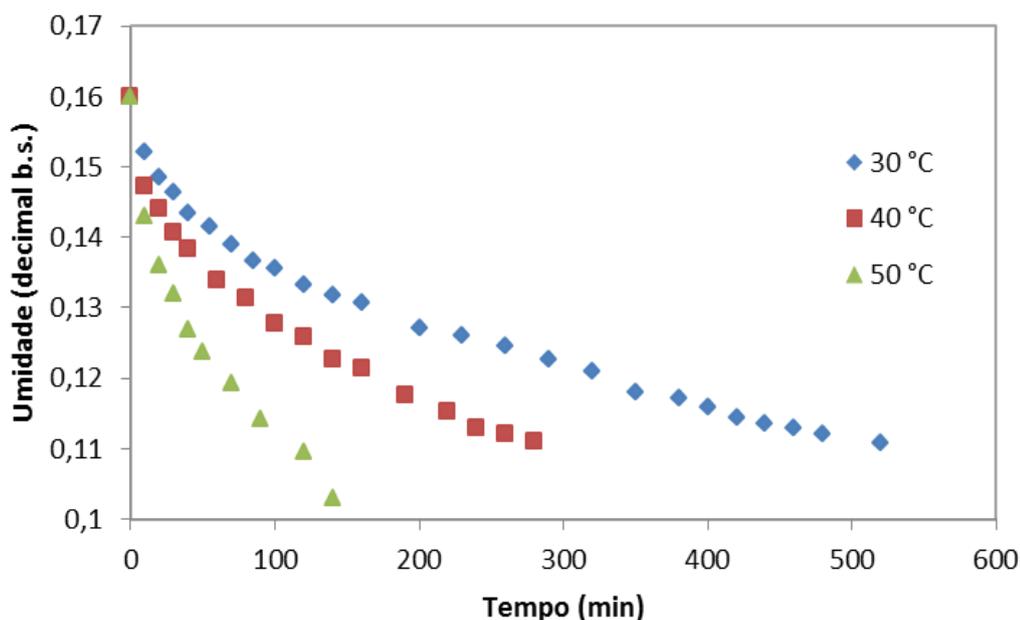


Figura 5 Curvas experimentais do teor de umidade (decimal) e do tempo de secagem (minutos) para as condições de temperatura (30, 40 e 50 °C), durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Novaera.

Não foi possível observar o período de taxa de secagem constante para as condições estudadas, verificando-se que a secagem das sementes ocorre no período de taxa decrescente. Estes resultados estão de acordo com os trabalhos realizados sobre a secagem de produtos, como pimenta-cumari (REIS *et al.*, 2011), feijão vermelho e preto (RESENDE *et al.*, 2008) e trigo (MOHAPATRA; RAO, 2005).

Com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorreu maior taxa de remoção de água, corroborando o trabalho de diversos pesquisadores, para vários produtos agrícolas, entre eles: Akpinar, Bicer e Yildiz (2003), Azzouz *et al.* (2002), Basunia e Abe, (2001), Kaymak-Ertekin (2002), Yaldiz, Ertekin e Uzun (2001) e Mohapatra e Rao (2005).

5.2 Modelagem matemática

Nas Tabelas 2 e 3, são apresentados os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os modelos de secagem analisados. São apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erros médios relativo (P) e estimado (SE), para os modelos ajustados para a secagem do feijão-caupi, cultivar BRS Guariba e BRS Novaera, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C.

Tabela 2 Coeficientes de determinação (R^2 , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os doze modelos analisados durante a secagem do feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, em diferentes condições de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Modelo	30°C			40°C			50°C		
	R ²	P	SE	R ²	P	SE	R ²	P	SE
Page	97,36	13,79	0,041	99,72	2,11	0,011	99,22	3,39	0,018
Henderson e Pabis	96,90	8,48	0,040	95,78	6,86	0,046	96,07	6,03	0,042
Midilli	99,27	6,40	0,020	99,83	1,17	0,096	99,23	3,39	0,018
Wang e Sing	95,96	18,45	0,100	96,05	11,54	0,072	96,85	7,13	0,044
Thompson	96,02	23,61	0,059	98,84	6,47	0,031	97,33	7,21	0,041
Page modificado	97,36	13,79	0,041	99,72	2,11	0,011	99,22	3,39	0,018
Newton	96,73	15,63	0,081	96,90	15,18	0,081	96,70	9,35	0,057
Logarítmico	96,87	8,59	0,040	98,10	4,68	0,030	98,43	4,56	0,026
Henderson & Pabis modificado	99,37	7,55	0,019	98,99	3,89	0,022	98,67	3,74	0,024
Exponencial de dois termos	97,44	10,89	0,058	98,51	9,35	0,050	98,54	5,00	0,032
Dois termos	99,37	7,55	0,019	99,67	2,31	0,012	99,30	3,27	0,017
Aproximação da difusão	99,37	7,55	0,019	98,99	3,88	0,022	98,67	3,74	0,024

Considerando-se as diversas condições de secagem para o feijão-caupi, cultivar BRS Guariba e BRS Novaera, verifica-se que, para as três temperaturas utilizadas na secagem, os doze modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 90% (Tabelas 2 e 3), indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), uma representação satisfatória do processo de secagem. Os modelos de Midilli, Henderson e Pabis modificado, Dois termos e aproximação da difusão são os que possuem os maiores valores de R^2 em todas as temperaturas de secagem estudadas para a cultivar BRS Guariba, enquanto que para a cultivar BRS Novaera tem-se os modelos de Page, Midilli, Page modificado e Dois termos os que apresentam os maiores valores para o coeficiente de determinação.

Tabela 3 Coeficientes de determinação (R^2 , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal) para os doze modelos analisados durante a secagem do feijão-caupi, cultivar BRS Novaera, em diferentes condições de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Modelo	30 $^{\circ}\text{C}$			40 $^{\circ}\text{C}$			50 $^{\circ}\text{C}$		
	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE
Page	97,85	4,53	0,027	97,42	3,42	0,025	99,05	1,97	0,014
Henderson e Pabis	94,23	6,33	0,044	91,23	5,27	0,046	90,33	5,36	0,048
Midilli	97,88	4,48	0,027	97,54	3,43	0,024	99,18	1,70	0,013
Wang e Sing	93,10	10,69	0,072	92,85	6,85	0,05	92,95	6,64	0,051
Thompson	97,56	5,25	0,031	97,37	3,47	0,025	98,98	2,05	0,015
Page modificado	97,85	4,53	0,027	97,42	3,43	0,025	99,05	1,97	0,015
Newton	94,98	12,52	0,084	92,26	10,31	0,079	91,61	9,84	0,075
Logarítmico	95,92	5,55	0,037	95,11	4,42	0,034	96,43	3,76	0,029
Henderson & Pabis modificado	97,07	5,25	0,032	96,45	4,07	0,029	98,40	2,32	0,019
Exponencial de dois termos	96,62	8,78	0,060	94,66	7,22	0,058	95,21	6,61	0,052
Dois termos	97,85	4,53	0,027	97,30	3,57	0,025	99,18	1,68	0,013
Aproximação da difusão	97,07	5,25	0,032	97,29	3,55	0,025	98,40	2,32	0,019

De acordo com Madamba, Driscoll e Buckle (1996), o coeficiente de determinação isoladamente não constitui um bom parâmetro para a seleção de modelos não lineares, por esta razão, utilizam-se os valores do erro médio relativo (P) e estimado (SE).

Analisando-se os valores do SE, nota-se que para a BRS Guariba, nas temperaturas em estudo, o modelo de Midilli apresentou o menor valor, seguido do modelo de Dois termos. Para a BRS Novaera o menor valor foi observado no modelo de Dois termos, seguido do modelo de Midilli. Corrêa *et al.* (2007) e Resende, Ferreira e Almeida (2010), também observaram que estes modelos apresentam baixos valores de (SE), durante a modelagem da secagem do feijão vermelho e do feijão-adzuki.

Conforme os dados das tabelas 4 e 5, os modelos Midilli e Dois termos apresentaram os melhores valores do erro médio relativo para ambas as cultivares, sendo inferiores a 10% que, conforme Mohapatra e Rao (2005), indica uma representação adequada do fenômeno.

Desta forma, os modelos de Midilli e Dois termos obtiveram os melhores ajustes aos dados experimentais da secagem do feijão-caupi, para as cultivares BRS Guariba e Novaera. Ambos os modelos apresentam comportamentos e resultados semelhantes, mas neste estudo seleciona-se o de Midilli para representar a cinética da secagem do feijão-caupi, por apresentar operações matemáticas simples e ser frequentemente recomendado e aplicado para prever o processo de secagem de produtos agrícolas. Esses resultados corroboram os obtidos por Goyalde *et al.* (2009) para a modelagem matemática da secagem da cana de açúcar, os de Morais (2010), quando relatou que o modelo de Midilli também representa satisfatoriamente a secagem do feijão-caupi (BRS Maratão) para 45 e 55 $^{\circ}\text{C}$ e de Reis *et al.* (2011), na modelagem da secagem da pimenta cumari do Pará.

As figuras 6 e 7 apresentam as curvas experimentais de secagem do feijão-caupi, para as cultivares BRS Guariba e BRS Novaera, experimentais e estimadas pelo modelo matemático de Midilli, em função do tempo (min) de secagem, para as temperaturas em estudo. Verifica-se pela correspondência entre os valores experimentais e estimados, ajuste satisfatório do modelo para a descrição da secagem do feijão-caupi em ambas as cultivares.

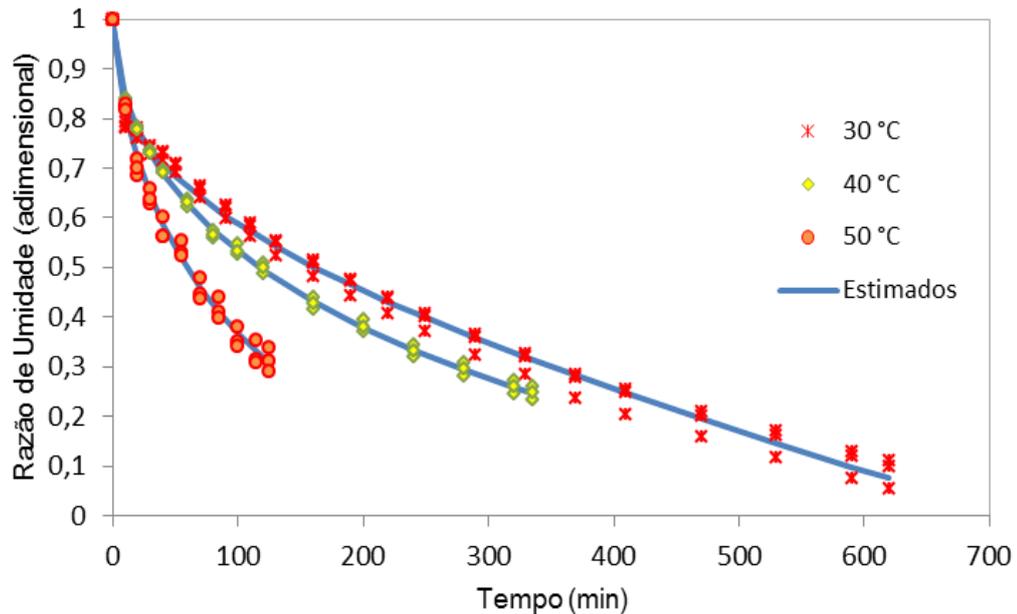


Figura 6 Valores experimentais da razão de umidade (RU, decimal) e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do feijão-caupi (BRS - Guariba) nas diferentes temperaturas.

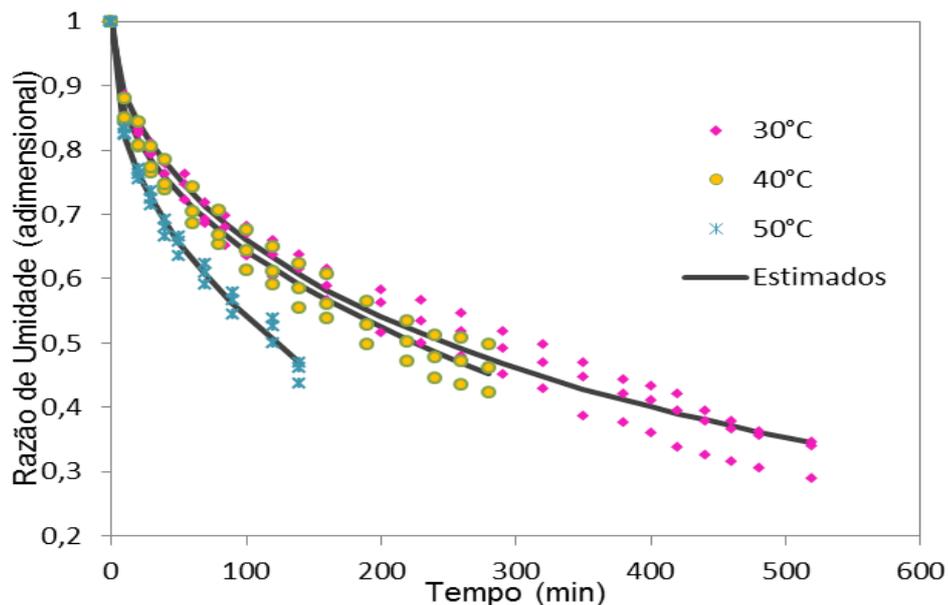


Figura 7 Valores experimentais da razão de umidade (RU, decimal) e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do feijão-caupi (BRS - Novaera) nas diferentes temperaturas.

Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados os coeficientes do modelo de Midilli ajustados em função da temperatura para a secagem do feijão-caupi na cultivar BRS Guariba e BRS Novaera nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, em diferentes condições de umidade relativa do ar de secagem.

Tabela 4 Coeficientes do modelo de Midilli durante a secagem do feijão-caupi (cultivar BRS Guariba), para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e umidade relativa do ar variando de 14% a 59%

Coeficientes	Temperatura (°C)			Equação
	30	40	50	
a	0,9931*	0,9985*	1,0015*	$a = -1 \times 10^{-05} \cdot T^2 + 0,0014 \cdot T + 0,9625$
k	0,0743*	0,0481*	0,0465*	$k = -0,0002 \cdot T^2 + 0,0189 \cdot T - 0,3682$
n	0,38844*	0,5426*	0,6549*	$n = -0,0002 \cdot T^2 + 0,0301 \cdot T - 0,3252$
b	-0,0005*	-0,0002*	-0,0002*	$b = -2 \times 10^{-06} \cdot T^2 + 0,0001 \cdot T - 0,0032$

Notas: *Significativos a 5% de probabilidade, pelo teste t.

Tabela 5 Coeficientes do modelo de Midilli durante a secagem do feijão-caupi (cultivar BRS Novaera) para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e umidade relativa do ar variando de 18% a 56%

Coeficientes	Temperatura (°C)			Equação
	30	40	50	
a	0,9830*	0,9999*	1,0001*	$a = -8 \times 10^{-05} \cdot T^2 + 0,0075 \cdot T + 0,8321$
k	0,0266*	0,0540*	0,0711*	$k = -5 \times 10^{-05} \cdot T^2 + 0,0063 \cdot T - 0,1174$
n	0,5870*	0,4304*	0,4198*	$n = 0,0007 \cdot T^2 - 0,0668 \cdot T + 1,9328$
b	0,0000*	-0,0003*	-0,0007*	$b = -5 \times 10^{-07} \cdot T^2 + 5E-06 \cdot T + 0,0003$

Notas: *Significativos a 5% de probabilidade, pelo teste t.

Analisando-se os resultados apresentados nas tabelas 4 e 5, tem-se que as magnitudes dos coeficientes a, k, n e b, para o modelo de Midilli, variam quadraticamente com a elevação da temperatura do ar de secagem. Observa-se que a constante (a), aumentou nas duas cultivares com o aumento da temperatura, (b) e (n) não apresentaram uma tendência clara em função do aumento da temperatura de secagem. Já a constante de secagem (k), para o modelo de Midilli, na cultivar BRS Guariba, diminuiu com o aumento da temperatura, o mesmo observou Martinazzo *et al.* (2007b), na modelagem matemática da descrição do processo de feijão. Na BRS Novaera a constante (k) aumentou com o aumento da temperatura, resultado observado por Santos *et al.* (2013), ajustando o modelo de Aproximação da Difusão aos dados experimentais da secagem de farinha de grãos residuais de urucum, relatando também o aumento do parâmetro k.

5.3 Coeficiente de difusão e energia de ativação

Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), a constante de secagem (k) pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente e à difusão líquida que controla o processo. Devido à influência da temperatura na constante de secagem, esta dependência pode ser descrita por meio da representação de Arrhenius (COSTA *et al.*, 2011, RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010).

Em virtude do mecanismo de transporte da água no interior do produto ocorrer por meio de difusão de vapor, utilizou-se a equação baseada na Lei de Fick com oito termos, para produtos com forma geométrica esférica, para calcular a partir dos dados experimentais, a difusividade efetiva do produto (D_{ef}).

Na Tabela 6 estão os valores do coeficiente de difusão efetivo para as sementes de feijão-caupi, para cada condição de secagem. Utilizando o raio equivalente 0,0037 m e 0,0035 m, para as cultivares BRS Guariba e Novaera, respectivamente. Os dados foram obtidos pelo ajuste da Equação 15 aos dados experimentais de secagem de feijão-caupi, com aproximação de oito termos, a partir dos quais se observou que o valor de D_{ef} não variava.

Os valores da difusividade das sementes de feijão-caupi, em ambas as cultivares, aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, com valores de $5,047 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $6,047 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $12,011 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente, na cultivar BRS Guariba. A cultivar BRS Novaera apresentou coeficiente de difusão variando de $2,482 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $5,187 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Resultado semelhante foi observado por Silva *et al.* (2008) na secagem do feijão-macassar, variedade sempre-verde, sob as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, os quais descrevem que o modelo esférico estabelecido para os grãos é satisfatório, resultando em difusividade efetiva que variou de $7,13 \times 10^{-11}$ até $14,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Tabela 6 Valores da difusividade efetiva (D_{ef}) obtidos para o feijão-caupi, nas duas cultivares em diferentes temperaturas do ar de secagem

Cultivar	Temperatura (°C)	D_{ef} ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	R^2 (%)
BRS Guariba	30	5,047	98,90
	40	6,047	99,59
	50	12,011	98,88
BRS Novaera	30	2,482	99,52
	40	2,823	99,20
	50	5,187	98,66

Almeida *et al.* (2009), estudando a secagem de grãos de feijão da variedade Adzuki na faixa de temperatura de 30 a 70 °C, obtiveram coeficientes de difusão na faixa de $0,51 \times 10^{-10}$ a $2,23 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. O menor valor observado foi para a temperatura de 30 °C e o maior para a temperatura de 70 °C. Resende *et al.* (2008) encontraram, ao secar duas variedades de feijão a 35 e 45°C, valores de $2,41$ a $4,83 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o feijão vermelho e de $1,39$ a $1,53 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o feijão preto. Park, Yado e Brod (2001) secaram a pera bartlett, na faixa de temperatura de 50 a 70 °C, e obtiveram que os valores do coeficiente de difusão aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando resultados entre $5,564 \times 10^{-9}$ e $1,370 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Tem-se que os valores obtidos neste trabalho para a difusividade efetiva de feijão-caupi são compatíveis com a faixa de valores encontrados na literatura para produtos biológicos entre 10^{-11} e $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Nas figuras 8 e 9 são apresentadas as variações do coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura para as sementes do feijão-caupi, nas duas cultivares em estudo. Verifica-se que, durante na secagem, o coeficiente de difusão efetivo aumenta linearmente com a elevação da temperatura. Conforme relatado, a cultivar BRS Guariba apresentou coeficientes de difusão superiores à outra cultivar. Costa *et al.* (2011), com o trabalho coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe, obtiveram coeficiente de difusão efetivo aumentou linearmente com a elevação da temperatura, apresentando valores de $0,88 \times 10^{-11}$; $1,99 \times 10^{-11}$; $2,90 \times 10^{-11}$; $3,48 \times 10^{-11}$ e $5,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para as temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente, durante a secagem do crambe.

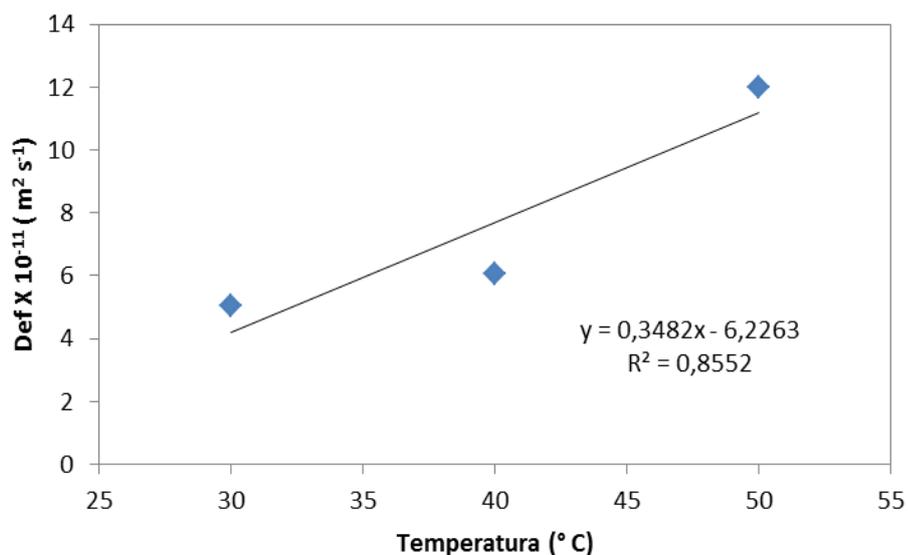


Figura 8 Valores do coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) obtidos para a secagem do feijão-caupi (BRS Guariba) nas temperaturas de 30, 40 e 50°C.

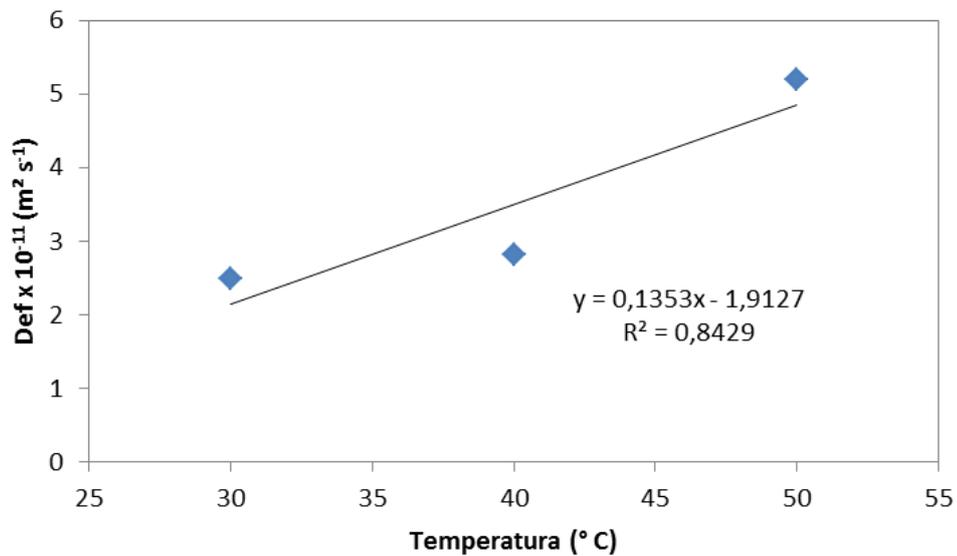


Figura 9 Valores do coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) obtidos para a secagem do feijão-caupi (BRS Novaera) nas temperaturas de 30, 40 e 50°C.

Os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram linearmente, corroborando os resultados relatados por Costa *et al.* (2011) e Resende, Ferreira e Almeida (2010). Nas figuras 10 e 11, visualizam-se os valores de D_{ef} na forma de “ $\ln D_{\text{ef}}$ ”, descritos em função do recíproco da temperatura absoluta (T^{-1}). Sua dependência com relação à temperatura do ar de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius. O ajuste linear obtido indica que houve uniformidade de variação da difusividade com a temperatura (REIS *et al.*, 2011), sendo o valor da variação do coeficiente de difusividade obtido a 50 °C, superior em relação às temperaturas de 30 e 40 °C, fato explicado em razão da vibração molecular de água, pois, segundo Gonelli *et al.* (2007), a variação do coeficiente de difusão efetivo se dá com a elevação da temperatura, o que aumenta o nível de vibração molecular das moléculas de água e contribui para uma difusão mais rápida.

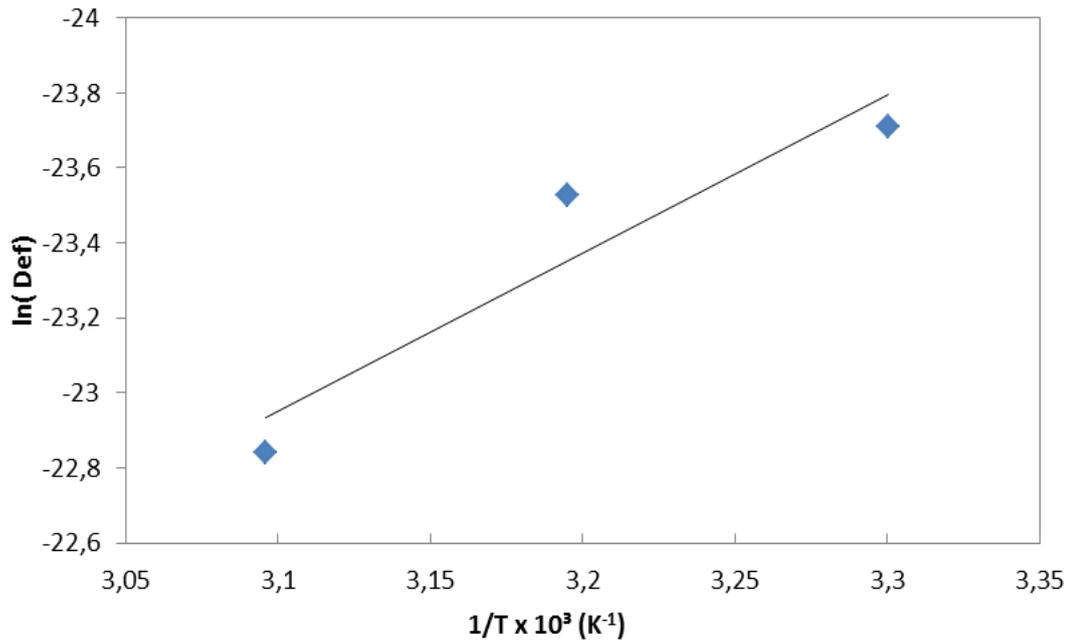


Figura 10 Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura do ar de secagem obtido durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Guariba.

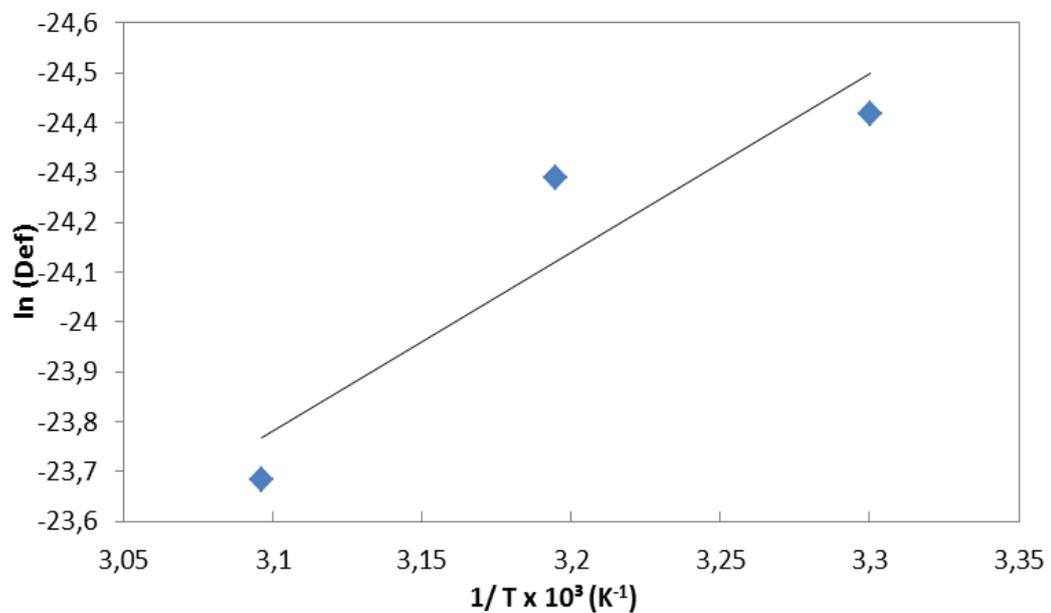


Figura 11 Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura do ar de secagem obtido durante a secagem do feijão-caupi cultivar BRS Novaera.

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de A . Nas equações 20 (BRS Novaera) e 21 (BRS Guariba) estão apresentados os coeficientes da expressão de Arrhenius, ajustada para os coeficientes de difusão efetivo do feijão-caupi.

$$D_{ef} = 5,09.10^{-5} \exp\left(\frac{35041,84}{R.T}\right) \quad (20)$$

$$D_{ef} = 3,09.10^{-6} \exp\left(\frac{29762,47}{R.T}\right) \quad (21)$$

Conforme pode ser observado nas equações 20 e 21, a energia de ativação para a difusão líquida no processo de secagem do caupi, na cultivar BRS Guariba foi de 29,76 kJ.mol⁻¹ e na cultivar BRS Novaera foi de 35,04 KJ.mol⁻¹. Nos processos de secagem quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto (REIS *et al.*, 2011), a energia de ativação é o valor mínimo necessário para que o processo de difusão ocorra.

Os valores encontrados estão próximos aos encontrados na secagem de outras variedades de feijão e para outros produtos agrícolas, conforme relatado por pesquisadores como Resende, Ferreira e Almeida (2010) que, ao secarem sementes de feijão-adzuki, obtiveram energia de ativação de 38,9391 kJ.mol⁻¹ para uma faixa de temperatura de 30 a 70 °C. Correa *et al.* (2007), avaliando a secagem do feijão em camadas delgadas, nas temperaturas de 35, 45 e 55 °C, verificaram que o produto apresentou energia de ativação para a difusão líquida de 10,08 kJ.mol⁻¹. Reis *et al.* (2011) secaram pimenta Cumari do Pará para as temperaturas de 45, 55 e 65 °C e obtiveram o valor da energia de ativação de 5,02 kJ.mol⁻¹. Costa *et al.* (2011), ao secarem sementes de crambe para temperaturas variando de 30 a 70 °C, obtiveram que o produto apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem de 37,07 kJ.mol⁻¹.

5.4 Qualidade fisiológica

Na Tabela 7 apresentam-se os valores do teste de germinação, expressos em porcentagem média de plântulas normais, anormais, mortas e duras para as sementes de feijão-caupi, antes do processo de secagem. Conforme os dados, as cultivares com o teor de umidade acima do normal para o armazenamento das sementes apresentaram

porcentagem média de plântulas normais igual ou inferior a 90%, sendo que quanto maior o teor de umidade durante a colheita e armazenamento mais reduzida a capacidade de germinação da semente, como pode ser observado na BRS Guariba, que apresentou porcentagem média de plântulas normais igual a 22% antes da secagem, fato que provavelmente se deve ao teor de umidade de 21% (b.u.) na ocasião da colheita.

Tabela 7 Porcentagem de plântulas normais, anormais e sementes mortas e duras do feijão-caupi antes da secagem

Cultivar	Normais (%)	Anormais (%)	Mortas (%)	Duras (%)
Guariba	22 a	47 a	31 a	0 b
Novaera	90 b	9 b	1 b	0 b

Notas: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Após o processo de secagem sob as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, os valores médios de porcentagem de plântulas normais para as duas cultivares variaram entre 87 e 97,5%, sendo os maiores valores observados para a secagem sob a temperatura de 40 °C, conforme Tabela 8. Quando os dados de germinação foram submetidos à análise de variância, detectou-se efeito significativo da temperatura sobre as variáveis em estudo para a cultivar BRS Guariba, a 5% de significância, observando-se que a secagem está exercendo influência sobre a germinação das sementes.

Tabela 8 Porcentagem de plântulas normais, anormais, e sementes mortas e duras do feijão-caupi, cultivar BRS Novaera após o processo de secagem das sementes nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C

Cultivar/ Temperatura	Normais (%)	Anormais (%)	Mortas (%)	Duras (%)
Novaera 30°C	94 a	6 a	0 a	0 a
Novaera 40°C	97,5 a	2 a	0,5 a	0 a
Novaera 50°C	93 a	5,5 a	1,5 a	0 a

Notas: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os dados apresentados são os obtidos das observações originais, seguidos das letras obtidas na comparação de médias em porcentagem transformados em arc sen

$$\sqrt{\frac{x}{100}}$$

Nos dados da Tabela 9, observa-se a influência do processo de secagem em sementes com alto teor de umidade na época da colheita, quando a cultivar BRS Guariba, antes do processo de secagem, apresentou baixa porcentagem média de plântulas normais e, após o processo de secagem, estes valores aumentaram para todas as temperaturas utilizadas no processo de secagem. O teste de Tukey, a 5% de probabilidade, apresentou

diferença significativa ($p < 0,05$) entre as temperaturas de secagem, para as condições em estudo.

Nota-se que, independente do fator cultivar, as sementes de feijão-caupi toleram as temperaturas de secagem mais elevadas, a exemplo de 40 e 50 °C, sem prejuízo imediato de sua qualidade fisiológica, pois os percentuais de plântulas normais foram superiores a 87%, acima, portanto, dos valores exigidos ($> 80\%$) pelo Ministério da Agricultura para comercialização das sementes da leguminosa em questão (BRASIL, 2009). Resultado semelhante foi relatado por Andrade *et al.* (2006), quando observaram que a germinação das sementes de feijão não foi influenciada imediatamente após a secagem de 40 °C.

Tabela 9 Porcentagem de plântulas normais, anormais, e sementes mortas e duras do feijão-caupi, cultivar BRS Guariba após o processo de secagem das sementes nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C

Cultivar/ Temperatura	Normais (%)	Anormais (%)	Mortas (%)	Duras (%)
Guariba 30°C	87 a	9 a	4 a	0 a
Guariba 40°C	92 a	7 a	1 a	0 a
Guariba 50°C	89 a	9 a	2 a	0 a

Notas: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os dados apresentados são os obtidos das observações originais, seguidos das letras obtidas na comparação de médias em porcentagem transformados em \arcsin

$$\sqrt{\frac{x}{100}}$$

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os valores médios do índice de velocidade de emergência (IVE) e a velocidade de emergência (VE) de plântulas do feijão-caupi, para as cultivares em estudo.

Tabela 10 Valores médios do índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE) de plântulas do feijão-caupi (BRS Guariba)

Cultivar BRS Guariba	IVE	VE (Dias)
Úmida	0 a	0 c
Secagem 30 °C	0,36 a	6,12 bc
Secagem 40 °C	1,21 a	2,08 ab
Secagem 50 °C	0,58 a	8,62 a

Notas: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se na Tabela 10 que não houve diferença estatística para o parâmetro IVE (índice de velocidade de emergência) na cultivar BRS Guariba, entre as sementes úmidas e aquelas submetidas ao processo de secagem, sendo o maior valor demonstrado para a temperatura de 40 °C, mostrando-se as mais vigorosas. Para a variável VE (velocidade de

emergência), as médias diferiram entre si. Para este parâmetro quanto maior o seu valor em dias menos vigorosas são as sementes. Os menores valores foram observados para as sementes úmidas seguidas das sementes secas a 50 °C.

Tabela 11 Valores médios do índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE) de plântulas de feijão-caupi (BRS Novaera)

Cultivar BRS Novaera	IVE	VE (Dias)
Úmida	0,72 a	8,49 a
Secagem 30 °C	0,67 a	8,36 a
Secagem 40 °C	9,60 b	8,30 a
Secagem 50 °C	6,35 b	8,49 a

Notas: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a cultivar BRS Novaera as sementes com maior IVE foram aquelas secas sob as temperaturas de 40 °C, mostrando-se mais vigorosas. Em relação à VE as sementes com menor vigor foram as úmidas e aquelas que passaram pelo processo de secagem a 50 °C. Baixo vigor foi avaliado em sementes de feijão-adzuki por Resende *et al.* (2012), quando estas foram secas a temperaturas do ar de secagem de 60 e 70 °C, afetando negativamente a qualidade fisiológica das sementes. O autor recomenda que a temperatura de secagem não exceda os 50 °C, evitando danos qualidade fisiológica das sementes. Comparando-se com os resultados deste estudo verifica-se que, já na temperatura de 50 °C, tem-se redução da qualidade fisiológica demonstrado pelo baixo vigor das sementes.

Comparando o índice de velocidade de emergência com a porcentagem de germinação de plântulas normais, verifica-se que as sementes de feijão-caupi apresentaram boa porcentagem de germinação, porém as mesmas não mostraram ser vigorosas.

Observa-se que o coeficiente de variação para os parâmetros IVE e VE foram classificados como altos, pois seus valores ficaram acima de 32,99%, sendo assim, os dados podem ser considerados heterogêneos, segundo Gomes (2000).

6 CONCLUSÕES

Nas condições em que foi desenvolvido este trabalho, pode-se concluir que:

- O tempo necessário para a secagem do feijão-caupi até o teor de umidade de aproximadamente 0,11 (decimal b.u.) foi de 10,4; 5,6 e 2,1 horas, para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente na cultivar BRS Guariba e de 8,7; 4,7 e 2,0 horas para a cultivar BRS Novaera, nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente.
- O modelo matemático de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, nas diferentes condições de secagem para as duas cultivares.
- O coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre $5,047 \times 10^{-11}$ a $12,011 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para a cultivar BRS Guariba e $2,482 \times 10^{-11}$ a $5,187 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, na cultivar BRS Novaera, para a faixa de temperatura de 30 a 50 °C.
- A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação de $35,04 \text{ kJ.mol}^{-1}$ e de $29,76 \text{ KJ.mol}^{-1}$, para a difusão líquida no processo de secagem das sementes de feijão-caupi.
- As sementes toleram as temperaturas de secagem até 50 °C, sem prejuízo imediato à germinação, apresentado os percentuais de plântulas normais superiores a 87%. Nas diferentes condições de estudo apresentaram em geral baixo vigor, sendo a secagem sob a temperatura de 40 °C a que menos afetou a qualidade fisiológica das sementes.

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Efeitos imediato e latente das condições de secagem sobre a qualidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “Ouro Negro 1992”**. 1997. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.
- 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.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Efeito imediato e latente da secagem de sementes de feijão colhidas com diferentes níveis de umidade. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, (Edição Especial), p.33-40, 2000.
- AGUERO, J. A. P.; VIEIRA, R. D.; BITTENCOURT, S. R. M. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 19, n. 2, p. 255-260, 1997.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 99-104, 2003.
- ALIZAGA, L. R.; MELLO, V. D. C.; SANTOS, D. S. B.; IRIGON, D. L. Avaliação de testes de vigor em sementes de feijão e suas relações com a emergência a campo. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 12, n. 2, p. 44-58, 1990.
- 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**, v. 2, n. 1, p. 72-83, 2009.
- AMBROSANO, E. J.; AMBROSANO, G. M. B.; WUTKE, E. B.; BULISANI, E. A.; MARTINS, A. L. M.; SILVEIRA, L. C. P. Efeitos da adubação nitrogenada e com micronutrientes na qualidade de sementes de feijoeiro cultivar IAC-Carioca. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 2, p. 393-399, 1999.
- ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C.; TEIXEIRA, L. P.; PEREIRA, R. G.; CALOMENTI, J. F., Cinética da secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, Niterói, RJ, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- ANDRADE, F. N.; ROCHA, M. M.; GOMES, R. L. F.; FREIRE FILHO, F. R.; RAMOS, S. R. R. Estimativas de parâmetros genéticos em genótipos de feijão-caupi avaliados para feijão fresco. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, CE, v. 41, n. 2, p. 253-258, abr.-jun., 2010.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, London, v. 55, n. 4, p. 323-30, 2002.
- BANZATO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 3. ed. Jaboticabal: Funep, 1989. 247 p.
- BASUNIA, M. A., ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice.

Journal of Stored Products Research , v. 37, p. 205-219, 2001.

BERBET, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A cultura. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.35, n.2, p. 15-18, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 2009. 395 p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

CHRIST, D. **Curvas de umidade de equilíbrio higroscópico e de secagem da canola (*Brassica napus* L. var. oleífera), e efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade das sementes**. 60 f. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

COIMBRA, R. A.; TOMAZ, C. A., MARTINS, C. C.; NAKAGAWA, J. Teste de germinação com acondicionamento dos rolos de papel em sacos plásticos. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 29, n. 1, p. 92-97, 2007.

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. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M.; Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, MG, v. 4, n. 1, p. 126-134, 2005.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 15, n. 10, p. 1089–1096, 2011.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.

DAMASCENO, S. C.; SILVA, K. J. Panorama do melhoramento e mercado do feijão-caupi no Brasil. **Agrosoft Brasil**. Publicado em 02/12/2008; Impresso em 25/10/2011. Disponível em: <<http://www.agrosoft.org.br/agropag/103401.htm>>. Acesso em: 26/11/2011.

DIAS, C. C. **Paiúhy**: das origens a nova capital. Teresina: Nova expressão, 2008.

DIAS, F. M.; TEIXEIRA, G. R.; ALCÂNTARA, G. R.; DEVILLA, I. A. Qualidade fisiológica de sementes de cultivares de feijão-caupi submetidas a diferentes condições de secagem. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia - GO, v. 8, n. 14; p. 807, 2012.

DOMINGOS, P.; SILVA, A. A.; SILVA, R. F., Qualidade da semente de feijão afetada por dessecantes, em quatro estádios de aplicação. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 19, n. 2, p. 275-282, 1997.

DOYMAZ, I. Drying kinetics of White mulberry. **Journal of Food Engineering**, Netherlands, v. 61, p. 341-346, 2004.

DURIGAN, J. F.; FALEIROS, R. R. S.; LAM SANCHES, A. A determinação das características tecnológicas e nutricionais de diversas variedades de feijão. **Revista Científica**, Jaboticabal, v. 6, n. 2, p. 215-223, 1978.

DUTRA, A. S.; TEÓFILO, E. M.; MEDEIROS FILHO, S.; DIAS, F. T. C. Qualidade fisiológica de sementes de feijão caupi em quatro regiões do estado do ceará. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 111-116, 2007.

EDMOND, J. B.; DRAPALA, W. J. The effects of temperature, sand and soil, and acetone on germination of okra seeds. **Proceedings of American Society of Horticultural Science**, Alexandria, v. 71, n. 2, p. 428-434, 1958.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA MEIO-NORTE. **Cultivo de feijão caupi**. jul. 2003. Disponível em: <http://www.cpamn.embrapa.br/pesquisa/graos/FeijaoCaupi/referencias.htm>. Acesso em: 16 ago. 2011.

Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO. Estatística da produção de feijão-caupi. nov. 2009. Disponível em: <http://www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php?id=34241>. Acesso em: 21 mai. 2011.

FARONI, L. R. A.; CORDEIRO, I. C.; ALENCAR, E. R.; ROZADO, A. F.; ALVES, W. M. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 1, p. 148-154, 2006.

FREIRE FILHO, F. R. Origem, evolução e domesticação do caupi. In: ARAÚJO, J. P. P.; WATT, E. E. (Org). **O caupi no Brasil**. Brasília, DF: IITA: EMBRAPA, 1988. p. 26-46.

FREIRE FILHO, F. R.; CRAVO, M. S.; VILARINHO, A. A.; CAVALANTE, E. S.; FERNANDES, J. B.; SAGRILLO, E.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SOUZA, F. F.; LOPES, A. M.; GONÇALVES, J. R. P.; CARVALHO, H. E. L.; RAPOSO, J. A. A.; SAMPAIO, L. S. BRS Novaera: Cultivar de feijão-caupi de porte semiereto. **Comunicado Técnico**, Belém, PA, set., 2008. ISSN 1517-2244.

FREIRE FILHO, F. R.; CRAVO, M. S.; VILARINHO, A. A.; CAVALANTE, E. S.; FERNANDES, J. B.; SAGRILLO, E.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SOUZA, F. F.; LOPES, A. M.; GONÇALVES, J. R. P.; CARVALHO, H. E. L.; RAPOSO, J. A. A.; SAMPAIO, L. S. **Cultivar de feijão-caupi BRS Novaera porte semiereto**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007.

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**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011. 84 p.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, S. M. S.; SITTOLIN, I. M. **BRS Guariba nova cultivar de feijão-caupi para a Região Meio-Norte**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2004. Folder.

FREITAS, J. R. B. **Determinação do nível de dano de *Crinocerus sanctus*(Fabricius 1775) em *Vigna unguiculata* (L.) WALP.** 2006. 46 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, 2006.

FROTA, K. M. G.; MORGANO, M. A.; SILVA, M. G.; ARAÚJO, M. A. M.; ARAÚJO, R. S. R. M. Utilização da farinha de feijão-caupi na elaboração de produtos de panificação. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, SP, v.30, n. 1, p. 520-531, 2009.

FROTA, K. M. G.; SOARES, R. A. M.; ARÊAS, J. A. G. Composição química do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), cultivar BRS-Milênio. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 470-476, abr.-jun. 2008

GANDAVO, P. M. **Tratado da terra do Brasil.** Tratado segundo. Das coisas que são gerais por toda costa do Brasil. Capítulo quarto. Dos mantimentos da terra. Rio de Janeiro: Ministério da Cultura. Fundação Biblioteca Nacional. Departamento Nacional do livro. Criado em: 10 jun. 2012. Disponível em: http://objdigital.bn.br/Acervo_digit/livros_eletronicos/tratado.pdf. Acesso em: 29 set. 2012.

GASPARIN, P. P. **Secagem da *Mentha piperita* em secador de leito fixo.** 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2012.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental.** 14. ed., Piracicaba: Nobel, 2000. 447 p.

GONELLI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS, S. A. Study of moisture diffusion in wheat grain drying. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, jan.-mar., 2007.

GOYALDE, N. A.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P.; GONELI, A. L. D.; ARAÚJO, F. L. Mathematical Modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 11, n. 2, p.117-121, 2009.

KAYMAK-ERTEKIN, F. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. **Journal of Food Science** . v. 67, n. 1, p. 168-175, 2002.

KEEY, R. B. **Drying principle and practices.** Oxford: Pergamon Press, 1972. 358 p.

LIMA, C. J. G. S.; OLIVEIRA, F. A.; MEDIEROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; JUNIOR, A. B. A. Resposta do feijão-caupi a salinidade da água de irrigação. **Revista Verde**, v. 2, n. 2, p. 79–86. 2007.

MACHADO, C. F.; FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; COSTA, D. S. S.; AMORIM, A. F. Herança da inflorescência composta da cultivar de feijão- caupi cacheado. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1347-1350, set./out., 2007

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

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for emergence and vigour. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes

comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, SP, v. 9, p. 68-72, 2007a.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 11, p. 301-306, 2007b.

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

MONTE, J. E. C.; MARTINS, J. H.; LOPES, D. C.; MONTEIRO, P. M. B.; PINTO, P. R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v. 30, n. 3, p. 307-312, 2008.

MORAIS, S. J. S. **Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, 2010.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho de plântulas. *In*: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. Cap.2, p. 1-21.

NOVEMBRE, A. D. L. C.; MARCOS-FILHO, J. Estudo da metodologia para condução do teste de germinação em sementes de algodão deslindadas mecanicamente. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, PR, v. 21, n. 2, p. 187-193, 1999.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. Seleção de processos e Equipamentos de Secagem. 2006. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/selprcequipsec.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2011.

PARK, K. J.; VOHNIKOZA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, London, v. 51, n. 3, p. 193-199, 2002.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PARK, Y. W.; JUÁREZ, M.; RAMOS, M.; HAENLEIN, G. F. W. Physico-chemical characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, Amsterdam, v. 68, p. 88–113, 2007.

RAMOS, H. M. M. **Características produtos, fisiológicas e econômicas do feijão-caupi para grãos verdes sob diferentes regimes hídricos**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, 2011.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 15, n. 4, p. 347–353, 2011.

RESENDE, O.; ALMEIDA, D. P.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Adzuki beans (*Vigna angularis*) seed quality under several drying conditions. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 32, n. 1, mar, 2012.

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.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R. M. Contração volumétrica na infusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 163-171, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 26, n. 3, p. 626-631, jul.-set. 2006.

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.

ROCHA, M. M. O feijão-caupi para consumo na forma de grãos frescos. **Agrosoft Brasil**, 11 nov. 2009. Disponível em: <http://www.agrosoft.org.br/agropag/212374.htm>. Acesso em: 23 out 2012.

ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, SP, v. 6, n. 1, p. 69-76, 2003.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.

SILVA, W. P.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA, C. D. P. S.; GUEDES, M.; LIMA, A. G. B. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 325-333, abr./jun. 2008.

SOUZA, L. C. D.; CARVALHO, M. A. C.; BRAGA, L. F.; SOUSA, M. P. Qualidade fisiológica de sementes de arroz da região de Matupá – MT. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 3, p. 110-116, 2005.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.

TOLEDO, M. Z.; FONSECA, N. R.; CEZAR, M. L.; SORATTO, R. P.; CAVARIANI, C.; CRUSCIOL, C. A. C. Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de feijão em função da aplicação tardia de nitrogênio em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia - GO, v. 39, n. 2, p. 124-133, abr./jun. 2009.

TORRES, S. B.; BRINGEL, J. M. M. Avaliação da qualidade sanitária e fisiológica de sementes de feijão-macassar. **Caatinga**, Mossoró, RN, v. 18, n. 2, p. 88-92, 2005.

TUNES, L. M.; PEDROSO, D. C.; BARBIERI, A. P. P.; CONCEIÇÃO, G. M.; ROETHING, E.; MUNIZ, M. F. B.; BARROS, A. C. S. A. Envelhecimento acelerado modificado para

sementes de coentro(*Coriandrum sativum* L.) e sua correlação com outros testes de vigor. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, RS, v. 9, n. 1, p. 12-17, 2011.

VIVANCO - PEZANTES, D. **Estudo das operações combinadas da desidratação osmótica a vácuo, defumação líquida e secagem em filés de bonito (Sarda sarda)**. 2006. 223 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, SP, 2006.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v.28, p.397-394, 2008.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 11, n. 78, p. 3001-3012, 1978.

YALDIZ, O.; ERTEKIN,C.; UZUN, H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v. 26, p. 457-465, 2001.

APÊNDICE

APÊNDICE A - COEFICIENTES DOS MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS

Tabela 1A Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados da curva de secagem do feijão-caupi cultivar BRS Guariba para a temperatura de 30, 40 e 50° C

Modelo	Temperatura 30 ° C						
	a	B	C	n	k	k ₀	k ₁
Page	-	-	-	0,6595	0,0267	-	-
Henderson e pabis	0,8511	-	-	-	0,0032	-	-
Midilli	0,9931	-0,0005	-	0,3844	0,0743	-	-
Wang e sing	-0,0053	0,000	-	-	-	-	-
Thompson	0,0000	0,1574	-	-	-	-	-
Page modificado	-	-	-	0,6595	0,0267	-	-
Newton	-	-	-	-	0,0042	-	-
Logarítmico	0,8471	-	0,0050	-	0,0033	-	-
Henderson & pabis modificado	13,3763	0,8165	-13,192	-	32,9988	-0,0030	-773,34
Exponencial de dois termos	0,1286	-	-	-	0,0275	-	-
Dois termos	0,8164	0,1834	-	-	-	0,0030	-1,2516
Aproximação da difusão	0,1834	0,0015	-	-	1,9433	-	-
Temperatura 40 ° C							
Page	-	-	-	0,6108	0,0386	-	-
Henderson e pabis	0,8660	-	-	-	0,0042	-	-
Midilli	0,9985	-0,0002	-	0,5426	0,0481	-	-
Wang e sing	-0,0053	0,000	-	-	-	-	-
Thompson	0,0000	0,1645	-	-	-	-	-
Page modificado	-	-	-	0,6108	0,0386	-	-
Newton	-	-	-	-	0,0054	-	-
Logarítmico	0,6836	-	0,2366	-	0,0087	-	-
Henderson & pabis modificado	13,3741	0,8210	-13,1951	-	32,9988	-0,0038	-773,349
Exponencial de dois termos	0,1482	-	-	-	0,0297	-	-
Dois termos	0,7593	0,2326	-	-	-	0,0034	0,0630
Aproximação da difusão	0,1791	0,0026	-	-	1,4802	-	-
Temperatura 50 ° C							
Page	-	-	-	0,6835	0,0431	-	-
Henderson e pabis	0,9145	-	-	-	0,0097	-	-
Midilli	1,0015	-0,0002	-	0,6549	0,0465	-	-
Wang e sing	-0,0121	0,0000	-	-	-	-	-
Thompson	0,0000	0,2041	-	-	-	-	-
Page modificado	-	-	-	0,6835	0,0431	-	-
Newton	-	-	-	-	0,0112	-	-
Logarítmico	0,6969	-	0,2738	-	0,0205	-	-
Henderson & pabis modificado	13,3589	0,8514	-13,2103	-	32,9988	-0,0085	-773,349
Exponencial de dois termos	0,1461	-	-	-	0,0616	-	-
Dois termos	0,7785	0,228	-	-	-	0,0074	- 0,0863
Aproximação da difusão	0,1486	0,0064	-	-	1,3406	-	-

Tabela 2A Coeficientes dos modelos matemáticos ajustados da curva de secagem do feijão-caupi cultivar BRS Novaera para a temperatura de 30, 40 e 50 °C

Modelo	Temperatura 30 °C						
	a	B	c	n	K	k ₀	k ₁
Page	-	-	-	0,5645	0,03098	-	-
Henderson e pabis	0,8562	-	-	-	0,002002	-	-
Midilli	0,9833	0,0000	-	0,5870	0,026641	-	-
Wang e sing	-0,00305	0,000004	-	-	-	-	-
Thompson	0,0000	0,124851	-	-	-	-	-
Page modificado	-	-	-	0,56455	0,03098	-	-
Newton	-	-	-	-	0,00264	-	-
Logarítmico	0,6003	-	0,30106	-	0,00465	-	-
Henderson & pabis modificado	13,3697	0,82988	-13,1995	-	32,9988	-0,0018	-773,3495
Exponencial de dois termos	0,1248	-	-	-	0,017576	-	-
Dois termos	0,78421	0,2089	-	-	-	0,00169	-0,0503
Aproximação da difusão	0,1701	0,0011	-	-	1,6708	-	-
Temperatura 40 °C							
Page	-	-	-	0,5209	0,0410	-	-
Henderson e pabis	0,8754	-	-	-	0,0026	-	-
Midilli	0,9999	-0,0003	-	0,4304	0,0540	-	-
Wang e sing	-0,0045	0,00001	-	-	-	-	-
Thompson	0,0000	0,1274	-	-	-	-	-
Page modificado	-	-	-	0,5209	0,04102	-	-
Newton	-	-	-	-	0,0035	-	-
Logarítmico	0,4913	-	0,4395	-	0,0094	-	-
Henderson & pabis modificado	13,3649	0,8395	-13,2044	-	32,9988	-0,0023	-773,3495
Exponencial de dois termos	0,1081	-	-	-	0,0267	-	-
Dois termos	0,8014	0,1934	-	-	-	0,0021	- 0,0759
Aproximação da difusão	0,1606	0,0016	-	-	1,4607	-	-
Temperatura 50 °C							
Page	-	-	-	0,5275	0,0543	-	-
Henderson e pabis	0,8898	-	-	-	0,0052	-	-
Midilli	1,0001	-0,0007	-	0,4198	0,0711	-	-
Wang e sing	-0,0089	0,00003	-	-	-	-	-
Thompson	0,0000	0,15504	-	-	-	-	-
Page modificado	-	-	-	0,5275	0,0543	-	-
Newton	-	-	-	-	0,0069	-	-
Logarítmico	0,4886	-	0,4721	-	0,0214	-	-
Henderson & pabis modificado	13,3687	0,8317	-13,2005	-	32,9988	-0,0043	-773,3495
Exponencial de dois termos	0,1098	-	-	-	0,0504	-	-
Dois termos	0,7955	0,2036	-	-	-	0,0038	- 0,1130
Aproximação difusão	0,1682	0,0036	-	-	1,1878	-	-