

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE FEIJÃO  
CULTIVAR IPR TANGARÁ**

LINEU FRANCO FERRANTI

CARIELI D'AVILA MIRANDA

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2016

# **CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE FEIJÃO CULTIVAR IPR TANGARÁ**

**LINEU FRANCO FERRANTI**  
Engenheiro Agrícola

**CARIELI D'AVILA MIRANDA**  
Engenheira Agrícola

Orientador: Prof. Dr. VALDINEY CAMBUY SIQUEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal da  
Grande Dourados, como parte das  
exigências para conclusão do curso de  
Engenharia Agrícola

**DOURADOS**  
**MATO GROSSO DO SUL**  
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

F373c Ferranti, Lineu Franco

Cinética de secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará / Lineu Franco  
Ferranti, Carieli D'Avila Miranda -- Dourados: UFGD, 2016.  
31f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Valdiney Cambuy Siqueira

TCC (graduação em Engenharia Agrícola) -Faculdade de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal da Grande Dourados.  
Inclui bibliografia

1. Modelos matemáticos. 2. propriedades termodinâmicas. 3. coeficiente de  
difusão efetivo. I Carieli D'Avila Miranda II. Título.

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

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

# **CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE FEIJÃO CULTIVAR IPR TANGARÁ**

Por

LINEU FRANCO FERRANTI

CARIELI D'AVILA MIRANDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para  
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovado em: 03/05/2016

---

Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira  
Orientador – UFGD/FCA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vanderleia Schoeninger  
Membro da Banca – UFGD/FCA

---

Mestranda Fernanda Pimentel da Silva  
Membro da Banca – UFGD/FCA

## **AGRADECIMENTOS – Lineu Franco Ferranti**

Agradeço ao Senhor Deus por me fortalecer e abençoar em todos os momentos vividos, por tornar meus objetivos possíveis de serem realizados, pelas provas superadas e por sempre me conduzir na caminhada evolutiva da vida.

À Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD por tornar possível a realização desta pesquisa.

Aos meus pais Lineu Álvaro Ferranti e Marlene Franco Alves Ferranti, por todo o amor, suporte, paciência e apoio, essenciais em minha vida, me servindo como referência de superação, dedicação e caráter.

Às minhas irmãs Laís Franco Ferranti pelo exemplo e inspiração à engenharia, e a Laura Franco Ferranti pelo carinho e parceria.

À minha avó paterna Lídia L. L. Ferranti que sempre foi participativa em cada etapa da minha vida, pelas conversas, ensinamentos e por ser uma pessoa especial para mim.

À Luciana Coelho Mazzaro por todo o amor, carinho, ajuda e por sempre apoiar meus objetivos, me incentivando e compartilhando comigo cada conquista.

Ao professor orientador e amigo Valdiney Cambuy Siqueira, pelos ensinamentos compartilhados, pela inspiração à trabalhar com pós-colheita de produtos agrícolas, pela paciência e ajuda na orientação e realização deste trabalho.

À colega e amiga de trabalho Carieli D'Avila Miranda, pela parceria e amizade desde o início do curso.

À toda a equipe de trabalho de pós-colheita: Alvaro, Fernanda, Guilherme, Indianara, Jean, Larissa, Luan, Lucas, Rafael e Stanley, por toda a parceria, ajuda, suporte e por não terem medido esforços para tornar possível a execução deste trabalho.

A todos os familiares, amigos adquiridos durante a graduação, professores do curso de Engenharia Agrícola, enfim, a todos que de alguma forma auxiliaram para que esta pesquisa fosse realizada.

## **AGRADECIMENTOS – Carieli D’Avila Miranda**

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele sempre me superabundou em Graça, me abrindo todas as portas das quais tenho batido, sempre me regendo, guiando, segurando-me em Suas mãos nos momentos mais difíceis, me guardando com amor e muita misericórdia. A Ele toda Glória até o fim dos dias.

A Universidade Federal da Grande Dourados, por todo suporte e oportunidades dadas para que essa caminhada de graduação em Engenharia Agrícola pudesse acontecer da melhor maneira possível.

Agradeço aos meus pais Elza D’Ávila dos Santos Miranda e Itor Daniel Miranda Ozório que desde o início sonharam esse sonho junto a mim e nunca mediram esforços para que eu alcance tudo que almejei, sempre acreditando na minha capacidade e dando apoio infinito para conquistar meus objetivos. Ao Alcides Lopes Plens Junior pela paciência em dias difíceis, apoio e parceria interminável.

Ao professor, orientador Valdiney Cambuy Siqueira pelos ensinamentos transmitidos, experiência compartilhada pacientemente, e por toda confiança e dedicação durante esse período.

Ao colega e amigo de trabalho Lineu Franco Ferranti, pela parceria, paciência e amizade desde o início dessa graduação.

Aos professores e colegas de faculdade, que acrescentaram de inúmeras formas na minha vida, houve muito crescimento, não só profissional, mas crescimento pessoal e interpessoal que será levado pelo resto da vida.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>9</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Cultura do feijão.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 Secagem .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3 Propriedades termodinâmicas.....</b>	<b>12</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Secagem dos grãos .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2 Modelos matemáticos .....</b>	<b>16</b>
<b>4.3 Coeficiente de difusão efetivo .....</b>	<b>17</b>
<b>4.4 Propriedades termodinâmicas.....</b>	<b>18</b>
<b>4.5. Análise estatística.....</b>	<b>19</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>5.1. Cinética de secagem.....</b>	<b>20</b>
<b>5.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo .....</b>	<b>23</b>
<b>5.3. Influência da temperatura .....</b>	<b>24</b>
<b>5.4. Propriedades termodinâmicas.....</b>	<b>25</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>27</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>

FERRANTI, L. F.; MIRANDA, C. D. **Cinética de secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará**. 2016. 32p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

## RESUMO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um produto de grande importância na alimentação humana devido as suas excelentes propriedades nutricionais, sendo uma das mais tradicionais fontes de proteína consumida. No entanto, se os processos pós-colheita aplicados à esta cultura forem realizados de forma inadequada podem comprometer essas propriedades. Diante da importância da cultura e das consequências dos processos pós-colheita mal conduzidos na sua qualidade, objetivou-se com o presente trabalho descrever o comportamento da secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará, por meio do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, determinar as propriedades termodinâmicas, bem como o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo. Os grãos de feijão foram coletados com teor de água inicial de aproximadamente 30% (b.u., base úmida), e submetidos à secagem nas temperaturas de 40, 45, 50, 55 e 60 °C, em condições controladas. Aos valores de razão de umidade dos grãos de feijão foram ajustados nove modelos matemáticos, utilizados para a representação do fenômeno de secagem de diversos produtos agrícolas. Os modelos de Page, Midilli, Dois Termos, Logarítmico, Thompson, Aproximação da Difusão, e Valcam são adequados para a representação da secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem. Os valores de entalpia e entropia específica são inversamente proporcionais a temperatura do ar de secagem, enquanto que a energia livre de Gibbs aumenta com a elevação da temperatura do ar.

**Palavras-chave:** Modelos matemáticos, propriedades termodinâmicas, coeficiente de difusão efetivo.

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um produto tradicional na alimentação da população brasileira, fornecendo nutrientes essenciais ao ser humano, como proteínas, ferro, cálcio, magnésio, zinco, vitaminas (principalmente do complexo B), carboidratos e fibras. É um excelente alimento, utilizado como alternativa em substituição a carnes ou outros produtos proteicos pela população de baixa renda (RIOS et al., 2003; MESQUITA et al., 2007).

Na fase pós-colheita do feijão, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, já que a redução do teor de água do produto diminui a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem nos grãos durante o armazenamento (RESENDE et al., 2010a).

A secagem é definida como processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no produto por meio de evaporação (BROOKER et al., 1992).

Para que ocorra a secagem é necessário fornecer energia na forma de calor para desencadear o processo de evaporação da água, e também a presença de um sorvedor para retirada do vapor de água liberado pelo material. O que determina as diversas condições de secagem são as características específicas de cada produto e as propriedades do ar de secagem.

As vantagens da secagem não se restringem apenas à conservação da qualidade do produto, já que através deste processo pode-se antecipar a colheita e liberar a área para novos plantios, reduzir as reações metabólicas que geram perda de massa dos produtos, dificultar ou inibir a proliferação de microrganismos e contribuir com as condições de armazenagem permitindo que o produto fique disponível em qualquer época do ano. Assim, a secagem deve ser planejada e prevista, de forma a melhorar o controle e administração de várias etapas do agronegócio, desde o plantio, armazenagem, e fornecimento do produto final.

A modelagem estatística é utilizada para representar a cinética de secagem de diversos produtos, e envolvem condições como, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e características do produto. Essas informações são fundamentais para simulações matemáticas de secagem em camada espessa. Portanto, auxiliam no processo de melhoria e desenvolvimento de equipamentos de secagem, pois tem a função de simular o comportamento de cada produto durante a redução do teor de água, sob sucessivas camadas delgadas (BERBERT et al., 1995).

O estudo das propriedades termodinâmicas é de grande importância para o dimensionamento dos equipamentos de secagem, pois envolvem o cálculo da energia necessária para que ocorra o processo e avaliam os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos (CORRÊA et al., 2010).

Embora seja encontrado na literatura uma gama de trabalhos na área de pós-colheita do feijão, existem muitas cultivar/variedades da cultura que ainda carecem de informações, sendo a IPR Tangará uma delas. Diante disso, torna-se relevante a execução de trabalhos para fins de descrição do processo de secagem para a aplicação de melhorias na eficiência desta importante etapa pós-colheita, que impacta diretamente nos custos de produção e na qualidade final do produto.

## **2 OBJETIVO**

Objetivou-se com o presente trabalho descrever o comportamento da secagem dos grãos de feijão da cultivar IPR Tangará, através do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, selecionar o que melhor representa o fenômeno, bem como determinar as propriedades termodinâmicas, o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Cultura do feijão

O feijão comum, *Phaseolus vulgaris* L., é uma leguminosa de tradições milenares na alimentação humana e considerado um dos alimentos mais antigos do mundo, com registro em grandes e antigas civilizações (ARAUJO et al., 1996).

O cultivo do feijão é realizado em praticamente todos os países de clima tropical e subtropical, e por ser rico em proteínas tem grande importância na nutrição humana (RESENDE et al., 2010a). Quando utilizado como única fonte proteica o valor nutritivo da proteína do feijão é baixo, porém se combinado com arroz, por exemplo, resulta uma mistura de proteínas mais nutritiva (MESQUITA et al., 2007).

Devido às suas propriedades nutritivas e terapêuticas, o feijão é um alimento muito utilizado para compor dietas de combate à fome e à desnutrição. Além de ser rico em proteínas, possui elevado teor de fibra alimentar, que junto às vitaminas e carboidratos, tornam seu consumo muito vantajoso como alimento funcional, pois representa uma importante fonte de nutrientes e energia, atuando na prevenção de vários tipos de câncer e distúrbios cardiovasculares (EMBRAPA, 2016).

O feijão apresenta em torno de 25% de proteína, que é rica no aminoácido essencial lisina, um aminoácido não produzido pelo organismo humano. Além de possuir boa quantidade de carboidratos, vitaminas, minerais, fibras e compostos fenólicos com ação antioxidantes que podem reduzir a incidência de doenças (EMBRAPA, 2016).

O Brasil é o maior produtor de feijão, sendo a maior parte de sua produtividade proveniente da agricultura familiar. A produtividade média do feijão brasileiro vem aumentando com o passar dos anos, gerando 1050 kg $ha^{-1}$  na safra de 2014/2015 (CONAB, 2015). Dentre a espécie *Phaseolus vulgaris* o grupo comercial carioca se destaca por seu sucesso comercial e seu papel importante na agricultura (BULISANI, 2008).

Produto cultivado por grandes e pequenos produtores com diversos sistemas de produção em todas as regiões brasileiras, o feijão possui grande importância econômica e social. Dependendo da cultivar e da temperatura ambiente, pode apresentar ciclos variando de 65 a 100 dias, o que o torna uma cultura apropriada para compor, desde sistemas agrícolas intensivos irrigados, altamente tecnificados, até aqueles com baixo uso tecnológico (EMBRAPA, 2016).

Dentre as várias espécies e variedades de feijão, a cultivar IPR Tangará se destaca entre as do grupo comercial carioca, por possuir bom potencial produtivo de 3326 kg $ha^{-1}$ ,

apresentar tolerância intermediária a altas temperaturas e à seca ocorridas durante a fase reprodutiva, e também é resistente a uma gama de doenças. As sementes possuem tegumento de cor bege clara com listras marrom claras, teor médio de proteínas de 22% e tempo médio de cozimento de 28 minutos (IAPAR, 2016). A massa de mil sementes desta cultivar varia entre 278,5 e 292,2 gramas (CASSOL et al., 2012). Devido a essas características a cultivar IPR Tangará se mostra adaptável às condições edafoclimáticas do Mato Grosso do Sul, viabilizando seu uso na região.

O feijão possui muitas variedades e por mais que exista uma grande quantidade de estudos realizados sobre a cultura, as novas variedades se apresentam carentes de trabalhos, principalmente na área pós-colheita (ANDRADE et al., 2006).

Devido a disseminação da cultura do feijão nas regiões de maior produtividade do país, novas técnicas de secagem vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de atender às demandas dos produtores, visando simplificar e reduzir os custos do processo (AFONSO JÚNIOR et al., 1999).

### **3.2 Secagem**

Para armazenar o produto de forma segura é necessário remover parte da água contida nos grãos, uma vez que a redução do teor de água diminui os riscos de infestações de microrganismos e as reações enzimáticas nos grãos, portanto a secagem é uma das práticas mais importantes na fase de pós-colheita (ANDRADE et al., 2006). A redução da atividade de água nos grãos também diminui a taxa de respiração, e por consequência, as reações metabólicas que geram perda de massa.

A secagem dos produtos agrícolas interfere diretamente na gestão do agronegócio, permitindo o planejamento da época de plantio, da colheita e da comercialização. Ou seja, influencia diretamente nos custos de produção e consequentemente no lucro dos agricultores. No Brasil esse impacto afeta diretamente a economia visto que a agricultura é uma das principais bases do agronegócio.

O teor de água final para o armazenamento se trata do valor máximo com o qual o produto pode ser estocado, por períodos pré-determinados, sem que ocorram deteriorações. Este teor de água varia em função de cada tipo de produto, mas para grãos geralmente o intervalo ótimo está compreendido entre 11% e 13% (ANDRADE et al., 2006).

Para projetar, desenvolver e otimizar secadores de grãos, é essencial a simulação e obtenção de informações teóricas acerca do comportamento de cada produto durante o processo de remoção de água (RESENDE et al., 2010a).

Diversos modelos matemáticos foram criados ao longo dos anos visando projetar, controlar e otimizar unidades de secagem (ROCHA et al., 2005). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (GINER e MASCHERONI 2002; BERBERT et al., 1995).

O processo de secagem em camada delgada se trata da secagem do produto com espessura de apenas uma unidade, sem sobreposição. A combinação de equações matemáticas do produto em camada delgada, juntamente com equações representativas de outras propriedades físicas de um determinado produto estudado, formam um conjunto de equações matemáticas que ajudam a entender melhor os processos de secagem em camada espessa. Sendo assim entende-se que camada espessa, são unidades de camadas delgadas sobrepostas umas às outras (KASHANINEJAD et al., 2007).

Existem três tipos de modelos que descrevem a cinética de secagem em camada delgada dos produtos agrícolas: os teóricos, empíricos e semi-empíricos. Os modelos teóricos consideram somente a resistência interna à transferência de energia e massa, entre o produto e o ar de secagem. Os modelos empíricos e semi-empíricos consideram apenas a resistência externa a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002). De maneira geral, os modelos empíricos e semi-empíricos tem se mostrado como melhores opções para representar o processo de secagem, mesmo tendo sua validade restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992).

Diversos modelos matemáticos têm sido ajustados de forma a descrever o fenômeno da secagem para vários produtos agrícolas. Dentre eles estão: Page, Thompson, Midilli, Newton, Wangh e Singh, Aproximação da difusão, Logarítmico, Dois Termos, Henderson e Pabis, Verna, Exponencial de dois termos e Valcam (CORRÊA et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2012, 2013; ANDRADE et al., 2006; KASHANINEJAD et al., 2007; RESENDE et al., 2010b).

### **3.3 Propriedades Termodinâmicas**

As propriedades termodinâmicas podem ser usadas na função de prever a mínima quantidade de energia necessária para remover água do produto. São relevantes quando a taxa de sorção de água é dada em função de um processo de transferência simultânea de calor e massa, para decifrar parâmetros da cinética do fenômeno de secagem e fazer deduções

aproximadas da microestrutura e das mudanças físicas que ocorrem na superfície do produto (AGUERRE et al., 1986).

A entalpia e entropia específica são parâmetros necessários para descrever o trabalho e para o entendimento qualitativo do estado da água na superfície do alimento (CORRÊA et al., 2010). Variações na entalpia indicam mudanças na energia de interação entre as moléculas de água e os constituintes do produto, durante o processo de sorção. A entropia está associada com a ligação ou repulsão das forças no sistema e se associa ao arranjo espacial da relação água-produto (MCMINN et al., 2005).

A energia livre de Gibbs é uma função termodinâmica de estado que representa a máxima quantidade de energia liberada em um processo à temperatura e pressão constantes, e que está disponível para realização de trabalho útil. Está ligada a entalpia e entropia, sendo o balanço entre as duas (TELIS-ROMERO et al., 2005). Essa grandeza é um indicativo da afinidade do produto pela água, sendo um critério avaliativo para a dessorção da água.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

O cultivo do feijoeiro foi realizado no período de inverno, com a semeadura feita dia 25 de março, em uma área de 400 m<sup>2</sup> da fazenda experimental localizada nas dependências da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD).

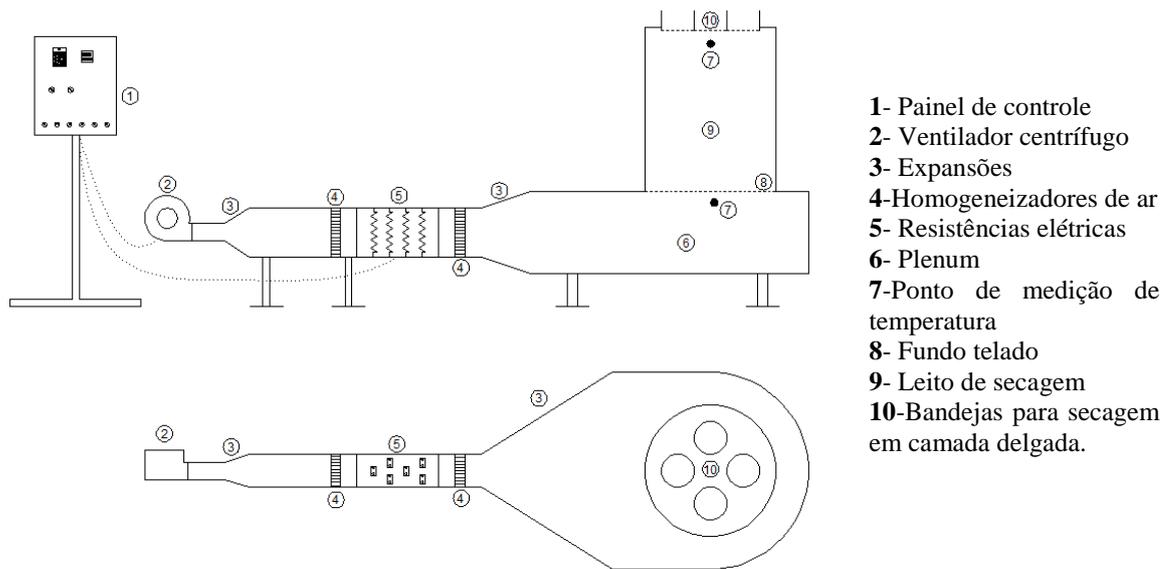
A coleta dos grãos foi realizada no dia 05 de julho, momento em que os grãos se apresentavam com teor de água de 30% (b.u.). Após a coleta, as vagens foram encaminhadas ao laboratório de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA.

No laboratório o produto foi trilhado e devidamente selecionado, de forma a retirar os grãos que apresentaram avarias, minimizando as probabilidades de erro.

### **4.1 Secagem dos Grãos**

Os grãos de feijão foram distribuídos em duas bandejas de fundo telado de forma a cobrir essa superfície, as bandejas foram alocadas no interior de um secador experimental. O secador é dotado de um sistema que controla com precisão o fluxo e a temperatura do ar de secagem, e dispõe de uma série de sensores conectados a um painel de controle, visando a obtenção de um ajuste fino e o monitoramento das condições do ar de secagem.

O secador experimental de camada fixa (Figura 1) possui como fonte de aquecimento um conjunto de resistências elétricas, totalizando 12 kW de potência, um ventilador Siroco, do fabricante Ibram, modelo VSI-160, o qual possui um motor de 1 cv. O controle de temperatura é realizado por meio de um controlador universal de processos, modelo N1200, da marca Novus, trabalhando com controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), e o fluxo de ar é selecionado por meio de um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador.



- 1- Painel de controle
- 2- Ventilador centrífugo
- 3- Expansões
- 4-Homogeneizadores de ar
- 5- Resistências elétricas
- 6- Plenum
- 7-Ponto de medição de temperatura
- 8- Fundo telado
- 9- Leito de secagem
- 10-Bandejas para secagem em camada delgada.

**Figura 1** - Secador experimental de camada fixa a ser utilizado na secagem dos grãos de feijão (MARTINS, 2015).

O teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio das amostras foram determinados utilizando o método de estufa descrito pela Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), utilizando estufa de ventilação forçada a  $105 \pm 1$  °C, durante 24 h, em três repetições. As temperaturas do ar de secagem utilizadas foram de: 40, 45, 50, 55 e 60 °C. Este intervalo de temperatura é comumente empregado para secagem de grãos e sementes de feijão. As temperaturas foram mantidas em condições controladas e monitoradas por um termômetro instalado no ponto 7 da Figura 1. A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas simultaneamente ao processo de secagem, utilizando um psicrômetro instalado próximo ao equipamento de secagem. A velocidade do ar de secagem foi monitorada com o auxílio de um anemômetro de pás rotativas, e ajustada em torno de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$ .

A secagem ocorreu até atingir o teor de água de  $11 \% \pm 1,0$  (b.u.), por ser um teor de água aplicável para o armazenamento seguro e também está dentro do padrão de comercialização do feijão. Com as pesagens periódicas em períodos de tempo pré-estabelecidos foram obtidos os dados necessários para ajustar os modelos matemáticos por regressão não linear.

A massa equivalente ao teor de água em que a secagem foi interrompida foi calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$M_{\text{final}} = \left( \frac{100 - U_i}{100 - U_f} \right) M_i \quad (1)$$

em que:

$M_{\text{final}}$  : massa final (kg);

$U_i$  : teor de água inicial (% b.u.);

$U_f$  : teor de água final (% b.u.); e

$M_i$  : massa inicial (kg).

A razão de umidade dos grãos de feijão foi determinada através da seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (2)$$

em que:

RX: razão de umidade do produto, adimensional;

X: teor de água do produto (decimal b.s.);

$X_i$ : teor de água inicial do produto (decimal b.s.); e

$X_e$ : teor de água de equilíbrio do produto (decimal b.s.).

#### 4.2 Modelos Matemáticos

Foram ajustados aos valores de razão de umidade dos grãos de feijão da cultivar IPR Tangará, nove modelos matemáticos, apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas

Modelo	Designação do Modelo	
Dois termos	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(3)
Aproximação da difusão	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k b t)$	(4)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k t)$	(5)
Midilli	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	(6)
Logarítmico	$RX = a \exp(-k t) + c$	(7)
Newton	$RX = \exp(-k t)$	(8)
Page	$RX = \exp(-k t^n)$	(9)
Thompson	$RX = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}}{2 b}\right)$	(10)
Valcam	$RX = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	(11)

em que:

t : tempo de secagem, h;

$k, k_0, k_1$  : parâmetros de secagem  $h^{-1}$ ; e  
 $a, b, c, d, n$  : coeficientes dos modelos.

### 4.3 Coeficiente de Difusão Efetivo

Para a determinação do coeficiente de difusão para as diversas temperaturas de secagem, foi utilizada a Equação 12, fundamentado na teoria de difusão líquida de Brooker et al. (1992), conforme a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{3}{r}\right)^2\right] \quad (12)$$

em que:

$D$ : coeficiente de difusão líquida,  $m^2 s^{-1}$ ;  
 $r$ : raio da esfera equivalente, m (0,008091 m);  
 $t$ : tempo de secagem, s;  
 $n$  : número de termos do modelo.

Para a obtenção do comprimento, largura e espessura foi utilizado um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm. Para obtenção da espessura média dos grãos de feijão, foram utilizadas 50 grãos escolhidos ao acaso.

O volume dos grãos de feijão foi obtido ao longo do processo de secagem, de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_g = \frac{\pi \cdot abc}{6} \quad (13)$$

em que:

$V_g$ : volume dos grãos,  $mm^{-3}$ ;  
 $a$ : comprimento, mm;  
 $b$ : largura, mm; e  
 $c$ : espessura, mm.

Para determinação do raio da esfera equivalente foi utilizado a Equação 14:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (14)$$

em que:

V: volume do grão, m<sup>3</sup>;

O comportamento do coeficiente de difusão efetivo em relação às diferentes temperaturas aplicadas durante o processo de secagem foi avaliado de acordo com a equação de Arrhenius, descrita na Equação 15:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (15)$$

em que:

D<sub>0</sub>: fator pré-exponencial;

R: constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>;

T<sub>a</sub>: temperatura, K; e

E<sub>a</sub>: energia de ativação, kJ mol<sup>-1</sup>.

#### 4.4 Propriedades Termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, foram determinadas através do método descrito por Jideani e Mpotokwana (2009), pelas Equações 16, 17 e 18.

$$h = E_a - RT_a \quad (16)$$

$$s = R \left( \ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_a \right) \quad (17)$$

$$G = h - T_a s \quad (18)$$

em que:

h : entalpia, J mol<sup>-1</sup>;

s : entropia, J mol<sup>-1</sup>;

G : energia livre de Gibbs, J mol<sup>-1</sup>;

k<sub>B</sub> : constante de Boltzmann, 1,38 x 10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup>; e

h<sub>p</sub> : constante de Planck, 6,626 x 10<sup>-34</sup> J s<sup>-1</sup>.

#### 4.5 Análise Estatística

Os dados experimentais provenientes da cinética de secagem em camada delgada dos grãos de feijão IPR Tangará, foram submetidos à análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton, empregando o software Statistica 8.0.

Para avaliação do grau de ajuste dos modelos, considera-se os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do erro médio relativo (P), do desvio padrão da estimativa (SE) e como se comporta a distribuição dos resíduos. Foram calculados os valores do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE) através das Equações 19 e 20:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (19)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (20)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$ : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

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

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Cinética de Secagem

Os parâmetros estatísticos (SE, P, e  $R^2$ ) utilizados para a comparação dos nove modelos ajustados aos dados experimentais de secagem dos grãos de feijão em cinco temperaturas são apresentados na Tabela 2. Pode-se verificar que a maioria dos modelos ajustados apresentaram valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) próximos a 0,98. Valor considerado satisfatório para representação do fenômeno de secagem (MADAMBA et al. 1996). Apenas os modelos de Henderson e Pabis e o de Newton não atenderam esse requisito. No entanto, é importante a utilização de mais critérios avaliativos para escolha do modelo. Assim, os valores de  $R^2$  foram usados de forma suplementar, ou seja, em conjunto análise dos demais parâmetros estatísticos.

**Tabela 2** - Parâmetros estatísticos obtidos para os nove modelos utilizados na secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará

Modelos	40			45			50			55			60		
	SE	P	$R^2$												
Page	0,0053	1,30	0,999	0,0040	0,60	0,999	0,0046	1,12	0,999	0,0073	1,35	0,998	0,0050	1,03	0,999
Dois termos	0,0515	9,45	0,944	0,0102	1,99	0,997	0,011	1,97	0,997	0,0116	2,53	0,996	0,0088	1,76	0,998
Logarítmico	0,0318	5,81	0,978	0,0311	5,54	0,978	0,0318	5,47	0,976	0,0283	4,29	0,981	0,0281	4,44	0,981
Thompson	0,0078	2,04	0,998	0,0045	1,06	0,999	0,0075	1,88	0,998	0,0124	2,71	0,996	0,0092	2,09	0,997
Aproximação da difusão	0,0123	2,55	0,996	0,0114	2,38	0,997	0,0123	2,37	0,996	0,0118	2,66	0,996	0,0090	1,84	0,998
Midilli	0,0028	0,31	0,999	0,0039	0,48	0,999	0,0017	0,23	0,999	0,0056	0,95	0,999	0,0031	0,36	0,999
Henderson e Pabis	0,0562	6,35	0,947	0,0536	10,12	0,933	0,0509	9,31	0,938	0,0444	7,58	0,952	0,0462	8,08	0,947
Newton	0,1064	15,98	0,805	0,1031	24,94	0,746	0,1025	24,47	0,743	0,0856	19,17	0,819	0,0874	19,78	0,805
ValCam	0,0257	2,87	0,991	0,0229	2,76	0,991	0,0221	3,39	0,988	0,0206	2,90	0,990	0,0189	2,69	0,991

Segundo Kashaninejad et al. (2007) os valores de erro médio relativo (P) refletem o desvio dos valores observados com relação a curva estimada pelo modelo. Verifica-se que, os modelos de Henderson e Pabis, na temperatura de 45 °C, e o de Newton, em todas as temperaturas, apresentaram valores do erro médio relativo superiores a 10% (Tabela 2). Modelos com valores de erro médio relativo acima de 10% não são adequados para a descrição de um determinado fenômeno (MOHAPATRA e RAO, 2005).

O desvio padrão da estimativa (SE) demonstra a capacidade de um modelo em descrever com precisão um determinado processo físico, e que quanto menor seu valor, melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos dados experimentais (DRAPER e

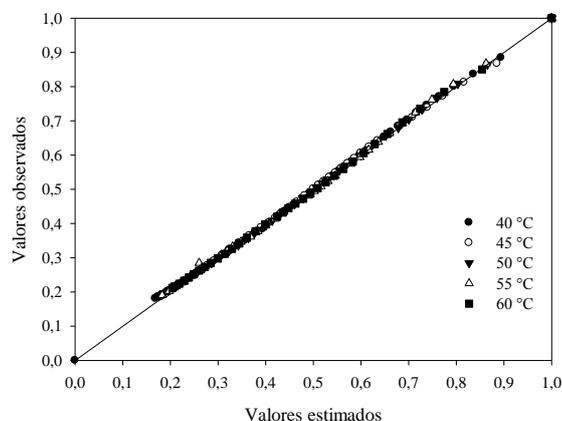
SMITH, 1998). Analisando os dados da Tabela 2 verifica-se que, assim como no caso do erro médio relativo, os modelos de Henderson e Pabis e o de Newton apresentaram os valores mais altos de desvio padrão da estimativa em todas as temperaturas de secagem, e não são adequados para a representação do fenômeno de secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará.

Utilizando os critérios de seleção de modelos já descritos, observa-se que, embora os modelos de Dois Termos, Logarítmico, Thompson, Aproximação da Difusão, e Valcam atendam os requisitos estatístico para descrição do fenômeno, os modelos de Page e o de Midilli se destacam, por apresentarem em média maiores valores de coeficiente de determinação e menores valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa, demonstrando excelente ajuste aos dados experimentais.

Entre os modelos que apresentam melhor ajuste, o modelo de Page é o mais simples, pois utiliza um menor número de parâmetros, sendo escolhido para representar o fenômeno de secagem em camada delgada dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará.

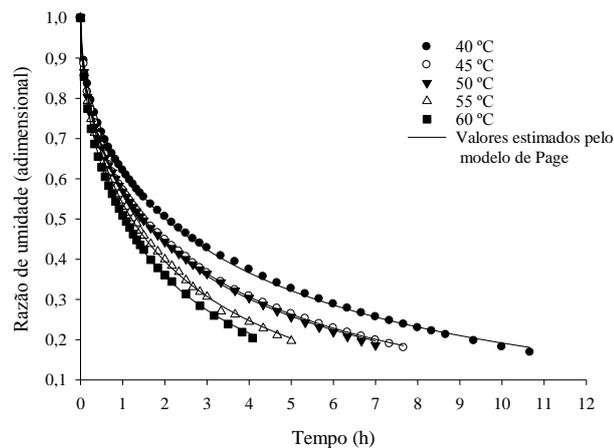
O modelo de Page também é recomendado para a representação da secagem em camada delgada de sementes de feijão da variedade “Ouro Negro 1992” (ANDRADE et al., 2006), e de diversos outros produtos agrícolas como: frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2013), grãos de milho-pipoca (CORRÊA et al., 2001), grãos de café descascados (GONELI et al., 2009), entre outros.

A curva formada pela plotagem dos dados observados e estimados pelo modelo de Page acompanha uma reta com inclinação de 45° (Figura 2). Isto indica o quão próximo ou preciso são os valores estimados pelo modelo com relação aos dados observados experimentalmente.



**Figura 2** - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará em diferentes temperaturas.

Os valores observados e estimados pelo modelo de Page, de razão de umidade em função do tempo para as cinco temperaturas do ar de secagem são apresentados na Figura 3. Nota-se o bom ajuste do modelo, demonstrando sua fidelidade na descrição do comportamento da secagem. Observa-se ainda que, a temperatura do ar de secagem e o tempo de secagem são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a temperatura, menor o tempo de secagem. Comportamento semelhante ao observado por Siqueira et al. (2012) e Corrêa et al. (2001).



**Figura 3** – Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page, para a secagem dos grãos de feijão da cultivar IPR Tangará.

Verifica-se ainda na Figura 3 que, no início do processo de secagem, a curva de razão de umidade é mais acentuada. Reflexo da maior taxa de remoção de água. Esse comportamento ocorre em virtude da facilidade que o grão, com elevadores teores de água, tem em desprender a água adsorvida, já que a mesma se encontra disponível sob uma fraca ligação molecular com o grão. Ao decorrer do processo, a taxa de remoção de água diminui, pois a água restante se encontra fortemente ligada ao grão, necessitando de maior energia para sua remoção.

Na tabela 3 são apresentados os parâmetros do modelo de Page ajustados aos dados experimentais de secagem nas diferentes condições de temperatura. Verifica-se que, conforme a temperatura do ar de secagem aumenta, o parâmetro “k” torna-se maior. Este parâmetro é utilizado como uma aproximação para descrever o efeito da temperatura e se relaciona à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, e à difusão líquida que controla o processo (MADAMBA et al., 1996; BABALIS & BELESSIOTIS, 2004). Não foi possível observar tendência definida para o coeficiente “n” do modelo de Page, o qual reflete a resistência interna do produto a secagem (MISRA & BROOKER, 1980).

**Tabela 3** – Parâmetro e coeficiente do modelo de Page para as diferentes temperaturas do ar de secagem

Temperatura (°C)	Parâmetro e coeficiente	
	k	n
40	0,472938	0,543096
45	0,553377	0,547291
50	0,564245	0,545374
55	0,617174	0,590567
60	0,68572	0,579842

## 5.2 Determinação do Coeficiente de Difusão Efetivo

Os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante o processo de secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará, para as cinco temperaturas do ar de secagem são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Valores do coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem para os grãos de feijão cultivar IPR Tangará

Temperatura (°C)	D x 10 <sup>-11</sup> (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
40	24,9009
45	33,8869
50	35,2061
55	44,0478
60	45,9522

Verifica-se na Tabela 4 que os coeficientes de difusão efetivo apresentaram magnitudes entre  $24,9 \times 10^{-11}$  e  $45,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para a faixa de temperatura compreendida de 40 a 60 °C. Almeida et al. (2009) relatam que o coeficiente de difusão do feijão adzuki apresentou valores entre  $5,1 \times 10^{-11}$  e  $22,3 \times 10^{-11}$  para temperaturas de secagem de 30°C a 70 °C. A diferença entre os valores do coeficiente de difusão entre as duas espécies, provavelmente está relacionada às características peculiares de cada produto, como a forma, tamanho, estrutura morfológica e composição química.

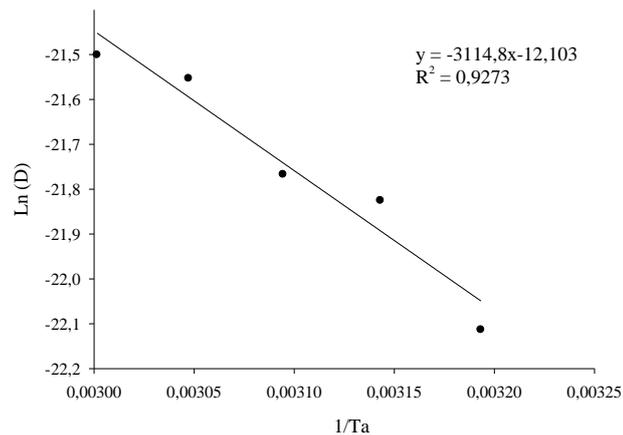
Segundo Granjeiro et al. (2007) a viscosidade dos líquidos diminui com a elevação da temperatura, devido ao aquecimento aumentar as distâncias intermoleculares do líquido e consequentemente diminuir as forças de atração entre as moléculas. Com a redução da viscosidade tem-se maior facilidade em desprender a água dos grãos, pois a mesma se

encontra com ligações intermoleculares fracas, resultando num coeficiente de difusão efetivo maior.

### 5.3 Influência da Temperatura

Os valores de  $\ln(D)$  em função do inverso da temperatura absoluta, para os grãos de feijão da cultivar IPR Tangará, estão apresentados na Figura 4. Nota-se que, para a faixa de temperaturas estudada, a variação da difusividade apresenta comportamento uniforme, linear e decrescente. Estando este comportamento diretamente relacionado aos valores do parâmetro “k” (Tabela 3).

A inclinação da curva de representação de Arrhenius gera uma relação E/R enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$  (RESENDE et al., 2010a).



**Figura 4** – Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas do ar de secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará.

Na equação 21 estão apresentados os coeficientes da equação de Arrhenius, ajustada para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de feijão, calculados de acordo com a Equação 15.

$$D_{ef} = 5,5428 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{25,8964}{R T_a}\right) \quad (21)$$

A energia de ativação para desencadear o processo de secagem, considerando os mecanismos de difusão foi de  $25,8964 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Este valor, é ligeiramente menor que os encontrados por Almeida et al. (2009) e Silva et al. (2008) trabalhando com feijão adzuki e feijão massacar, que foram respectivamente de  $31,16 \text{ kJ mol}^{-1}$  e  $26,9 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Segundo Zogzas et al. (1996), a energia de ativação dos produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 KJ mol<sup>-1</sup>. Portanto a energia de ativação do feijão cultivar IPR Tangará se encontra dentro do intervalo de variação da energia de ativação dos produtos agrícolas.

#### 5.4 Propriedades Termodinâmicas

Os valores de entalpia específica (h), entropia específica (s) e energia livre de Gibbs (G) calculados para as diferentes condições de secagem dos grãos de feijão, se encontram apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Propriedades termodinâmicas do processo de secagem em camada delgada dos feijões da cultivar IPR Tangará

T (°C)	h (kJ mol <sup>-1</sup> )	s (kJ mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	G (kJ mol <sup>-1</sup> )
40	23,2928	-0,3459	131,6271
45	23,2513	-0,3461	133,3572
50	23,2097	-0,3462	135,0878
55	23,1681	-0,3463	136,8192
60	23,1265	-0,3465	138,5511

Os valores de entalpia específica (h) e de temperatura do ar de secagem são inversamente proporcionais. Com a elevação da temperatura do ar de secagem, a pressão parcial de vapor da água presente nos grãos aumenta, enquanto que a pressão de vapor do ar se mantém constante durante seu aquecimento. Dessa forma, a água se movimenta do interior para a superfície do produto com mais intensidade e, por consequência reduz o tempo de secagem. Segundo Oliveira et al. (2010) menores valores de entalpia significam menor energia necessária para remover a água ligada aos grãos durante o decorrer da secagem.

O mesmo comportamento observado para a entalpia específica, foi observado para a entropia específica (s), apresentando-se inversamente proporcional em relação a temperatura do ar de secagem. Segundo Moreira et al. (2008), esse resultado ocorre devido a menores temperaturas proporcionarem menor excitação das moléculas de água, gerando assim aumento da ordem do sistema água-produto. Os valores negativos de entropia se atribuem à existência de adsorção química ou alterações naturais do adsorvente.

A energia livre de Gibbs é um indicativo da afinidade do produto pela água, sendo um critério avaliativo para a dessorção da água. Valores de energia de Gibbs negativos, indicam que o processo de dessorção da água é espontâneo, enquanto para os valores positivos é não

espontâneo (TELIS et al. 2000). Os valores observados para os grãos de feijão cultivar IPR Tangará são positivos e diretamente proporcionais a temperatura. Este comportamento ocorre em virtude da dessorção de água nos grãos não acontecer de forma espontânea, pois necessita da energia térmica do ar de secagem para redução do teor de água.

## 6 CONCLUSÃO

Os modelos de Page, Midilli, Dois Termos, Logarítmico, Thompson, Aproximação da Difusão, e Valcam são adequados para a representação da secagem dos grãos de feijão cultivar IPR Tangará. Dentre eles o modelo de Page foi o escolhido para representar o fenômeno.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem.

Os valores de entalpia específica e entropia específica são inversamente proporcionais ao aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto que a energia livre de Gibbs aumenta com a elevação da temperatura do ar.

A energia de ativação para desencadear o processo de secagem, considerando os mecanismos de difusão foi de  $25,8964 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P.C.; Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.34, 1999.
- AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Enthalpy entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. **Journal of Food Science**, v.51, n.6, p.1547-1549, 1986.
- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna Angularis* L.). **Global Sciency Technology**, v.2, n.1, p.72-83, 2009.
- ANDRADE, E. T.; CORREA, P.C.; TEIXEIRA, L.P.; Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, v.8, n.2, p.83-95, 2006.
- ARAUJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Potafos, 1996, 786p.
- BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, n.3, p.449-458, 2004.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; FILHO, J. B. P. Simulation of coffee drying in afixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, n.3, p.167-173, 1995.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. **Brasília: Mapa/ACS**, 2009, 399p.
- 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.
- BULISANI, E. A; **Feijão Carioca – uma história de sucesso**. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2008\\_4/FeijaoCarioca/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2008_4/FeijaoCarioca/index.htm)>. 2008. Acesso: 17 Abril 2016.

CASSOL, F. D. R.; FORTES, A. M. T.; NUNES, J. V. D.; VEIT, M. R.; CRUZ, M. Qualidade fisiológica de lotes de sementes de feijão em função do armazenamento. **Cultivando o saber**, v.5, n.2, p.85-97, 2012.

CONAB – Companhia nacional de abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira de Grãos 2014/2015**, v.2, n.12, 2015.

CORRÊA, P. C.; MACHADO, P. F.; ANDRADE, E. T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, v.25, n.1, p.134-142, 2001.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v.57, n.5, p.595-601, 2010.

DRAPER, N. R.; SMITH, D. H. **Applied regression analysis**. 3<sup>th</sup> ed. New York John: Wiley e Sons, 1998, 712 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistemas de produção: Cultivo do feijoeiro comum**. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro>>. Acesso: 16 Maio 2016.

TELIS-ROMERO, J.; KOHAYAKAWA, M. N.; SILVEIRA JR, V.; PEDRO, M. A. M.; GABAS, A. L. Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.2, p.297-303, 2005.

GINER, S. A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Postharvest Technology**, v.81, n.1, p.85-97, 2002.

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

GRANJEIRO, A. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MATA M. E. R. M. C.; Viscosidades de polpas concentradas de figo-da-Índia. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.13, n.2, p.219-224, 2007.

IAPAR, Instituto Agrônômico do Paraná. **Características cultivares feijão**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1363>>. Acesso: 15 Abril 2016.

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

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

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

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

MCMINN, W. A. M.; AL-MUHTASEB, A. H.; MAGEE, T. R. A. Enthalpyentropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, v. 38, n. 5, p. 505-510, 2005.

MESQUITA, F. R.; CORRÊA A. D.; ABREU, C. M. P. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, n.4, p.1114-1121, 2007.

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

MISRA, M. K.; BROOKER, D.B. Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **Transaction of the ASAE**, v.12, n.8, p.1.254-1.260, 1980.

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

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

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v.88, n.4, p.514-521, 2008.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; VALENTE, D. S. M.; BOTELHO, F. M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v.45, n.3, p.546-554, 2010.

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

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**, v.12, n.2, p.171-178, 2010a.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazônica**, v.40, n. 2, p. 247-256, 2010b.

RIOS, A. O.; ABREU, C. M. P.; CORRÊA, A. D. Efeito da estocagem e das condições de colheita sobre algumas propriedades físicas, químicas e nutricionais de três cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência Tecnologia dos Alimentos**, v.23, p.39-45, 2003.

ROCHA, D. C.; SANTOS, B.M.; SCHEID, C.M.; CALÇADA, L.A. Determinação dos coeficientes de difusão e convectivo na Secagem de sementes de *Nasturtium officinale* (agrião). In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, v. 6, 2005.

SILVA, W. P.; MATA, M. E. R. M. C. et al. 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**, v.28, n.2, p.325-333, 2008.

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

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

TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v.343, n.1-2, p.49-56, 2000.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.