

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO  
PROCESSO DE SECAGEM DE MILHO**

RAQUÉL BONACINA VITORINO

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2009

# **MODELAGEM E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE MILHO**

RAQUÉL BONACINA VITORINO  
Engenheira Agrônoma

Orientador: PROF. DR. CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA

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

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2009

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROCESSO DE  
SECAGEM DE MILHO**

por

Raquél Bonacina Vitorino

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

Aprovado em: 13 de julho de 2009.

---

Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza  
Orientador – UFGD/FCA

---

Prof. Dr. Antonio Dias Robaina  
Co-Orientador – UFGD/FCA

---

Prof. Dr. André Luis Duarte Goneli  
UFGD/FCA

---

Dra. Maria Izabel Kruger Giurizatto  
IAGRO

*“Aos meus pais João Batista e Iria, exemplos de todas as qualidades que um ser humano é capaz de obter e desenvolver durante a sua vida.”*

**DEDICO.**

*“Ao meu amado marido Antonio Carlos, por ser o meu “porto seguro”, pelo incentivo e pelo amor incondicional.”*

**OFEREÇO.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por cada amanhecer.

Ao meu orientador Prof. Cristiano Márcio Alves de Souza, pelos valiosos ensinamentos, pela amizade e pela orientação.

Ao meu co-orientador Prof. Antonio Dias Robaina, pelas sugestões e ensinamentos.

Ao Prof. André Luís Duarte Goneli, pelas sugestões e críticas que enriqueceram o trabalho, bem como o meu conhecimento.

A Izabel (“chefa”), pelo apoio nos momentos árdios e pelo incentivo para o término desse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pela oportunidade.

À FUNDECT, pela bolsa concedida.

À Empresa Sementes Guerra, pelo apoio na realização desse trabalho e pelo incentivo a pesquisa.

Aos funcionários da Sementes Guerra, em especial Nita, Luiz, Jeremias, Renato e Cleumir.

Aos alunos de graduação Antonio, Rômulo e José Assis “Zé” pela agradável companhia e pelo empenho na execução das atividades.

Aos funcionários da UFGD “Seu Jesus” e “Seu Moacir”, Nilda, Eva “Tia Eva” e Vicente.

À toda minha Família, em especial minhas irmãs Má e Dode.

A todos, próximos ou distantes que, de alguma forma contribuíram para que esses momentos fossem possíveis de se realizar.

Muito obrigada!!!!

## SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO GERAL . . . . .	vi
ABSTRACT. . . . .	vii
INTRODUÇÃO GERAL. . . . .	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. . . . .	4
CINÉTICA DE SECAGEM DE MILHO EM CAMADA DELGADA. . . . .	6
Resumo. . . . .	6
Abstract. . . . .	6
Introdução. . . . .	7
Material e métodos. . . . .	10
Resultados e discussão. . . . .	14
Conclusões . . . . .	22
Referências bibliográficas. . . . .	23
MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE MILHO EM SECADOR COM DISTRIBUIÇÃO RADIAL DO AR. . . . .	26
Resumo. . . . .	26
Abstract. . . . .	26
Introdução. . . . .	27
Material e métodos. . . . .	29
Resultados e discussão. . . . .	39
Conclusões. . . . .	48
Referências bibliográficas . . . . .	49
CONCLUSÕES GERAIS. . . . .	52

## **MODELAGEM E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE MILHO**

### **RESUMO**

VITORINO, Raquel Bonacina, M.Sc., Universidade Federal da Grande Dourados, julho de 2009. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho.** Orientador: Cristiano Márcio Alves de Souza. Co-orientador: Antônio Dias Robaina.

O presente trabalho teve por objetivo determinar a cinética de secagem de grãos de milho em camada delgada, bem como simular o processo de secagem de grãos de milho em secador com distribuição radial do ar de secagem. Para a cinética de secagem, foram utilizados grãos de milho da variedade Dekalb 979 colhidas na Fazenda Capão Verde, localizada no município de Ponta Porã-MS. Foi estudada e modelada a cinética de secagem em camadas delgadas de grãos de milho aplicando-se seis modelos tradicionalmente usados para tal finalidade. Além disso, foi determinado o coeficiente de difusão e a energia de ativação para a faixa de temperatura de 40 a 70°C. Na implementação do modelo matemático para simular a secagem de grãos de milho em leito fixo com distribuição radial do ar, o leito de grãos foi considerado como formado por várias camadas com espessuras reduzidas, colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e do grão, em cada camada, foram calculadas com base em pequenos incrementos de tempo. Um programa computacional foi desenvolvido utilizando-se a linguagem de programação MS Visual Basic, versão 6. Esse programa, denominado VertiSec<sup>®</sup>, apresentou interface do usuário amigável, sendo flexível para simular o processo de secagem de grãos de milho em secador com distribuição radial do ar de secagem. Visando validar o modelo matemático implementado as secagens foram realizadas em grãos de milho BRS 3150, em escala comercial, com temperatura do ar de 40 e 50 ± 2°C. Durante a secagem foram monitorados a temperatura do plenum, a umidade relativa ambiente, o teor de água e a temperatura da massa de grãos, a temperatura ambiente, a temperatura e a umidade relativa de exaustão. De acordo com os resultados encontrados verificou-se que todos os modelos estudados (Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis, Midilli, Page e Newton) foram satisfatórios. O coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre  $0,37569 \times 10^{-9}$  e  $1,20372 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>. O modelo matemático implementado para simular a secagem em secador com distribuição radial do ar, mostrou-se viável, apresentando precisão satisfatória, sendo válido para simular a secagem de milho.

## **MODELING AND MATHEMATICAL SIMULATION OF THE CORN DRYING PROCESS**

### **ABSTRACT**

VITORINO, Raquel Bonacina, M.Sc., Universidade Federal da Grande Dourados, July of 2009. **Modeling and mathematical simulation of the corn drying process.** Adviser: Cristiano Márcio Alves de Souza. Committee Member: Antônio Dias Robaina.

The current paper aimed to determine the drying kinetics of corn grains in thin layer, as well as simulate the drying process of corn grains in dryer with drying air radial distribution. For the drying kinetics, Dekalb 979 corn grains were used and harvested at Capão Verde Farm, located in Ponta Porã-MS. It was studied and modeled the drying kinetics in thin layers of corn grains applying six models traditionally used for this purpose. Besides, it was determined the diffusion coefficient and the activation energy for the temperature range from 40 to 70°C. In the mathematical model implementation to simulate the corn seeds drying in fixed bed with air radial distribution, the grains bed was considered to be formed with several layers with reduced thickness, placed on one another. The variations on the air and seed conditions, in each layer, were calculated basing in small time increments. A software was developed using MS Visual Basic programming language. This software, called VertiSec, showed user friendly interface, being flexible to simulate the corn seeds drying process in dryer with drying air radial distribution. In order to validate the implemented mathematical model, the dryings were carried out in BRS 3150 corn seeds, in commercial measure, with air temperature ranging between 40 and 50±2°C. During the drying, they monitored plenum temperature, the relative humidity, the moisture and the seeds mass temperature, the environment temperature, the temperature and the exhaustion relative humidity. According to the found results it was noticed that all the studied models (Two Terms, Exponential Two Terms, Henderson and Pabis, Midilli, Page and Newton) were satisfactory. The diffusion coefficient increases with the temperature rise, showing ratings between  $0.37569 \times 10^{-9}$  and  $1.20372 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . The implemented mathematical model to simulate the drying in dryer with air radial distribution showed to be practicable, showing satisfactory accuracy, being able to simulate the drying corn.



## INTRODUÇÃO GERAL

Entre os principais produtores mundiais de milho, o Brasil é o que apresenta as melhores condições de ampliar as exportações e, conseqüentemente, sua participação no abastecimento internacional do grão. Isso eleva a responsabilidade do setor produtivo que deve buscar alternativas de aumentar a oferta do produto no comércio mundial. No entanto, o crescimento da produção deverá ser acompanhado por redução de perdas e melhor utilização da energia no processo produtivo. Segundo Alves et al. (2001), existem ainda no país muitos pontos que necessitam ser aprimorados a fim de melhor atender às exigências dos mercados interno e externo, quanto à qualidade dos grãos, de forma que as práticas adotadas para a colheita e o armazenamento sejam as mais adequadas, pois a secagem e a armazenagem estão diretamente ligadas ao nível de qualidade final do milho produzido.

Na agricultura brasileira, o milho ocupa lugar de destaque na produção de grãos, sendo que entre todos os cereais cultivados no país, o milho na safra 2007/2008, apresentou a segunda maior produção, com cerca de 58,6 milhões de toneladas de grãos, em uma área de aproximadamente 15 milhões de hectares (CONAB, 2009).

Para a colheita mecânica do milho em grão, o momento ótimo da colheita ocorre quando o grão atinge entre 18 e 24% de água, devendo o produto colhido passar pelo processo de secagem num tempo máximo definido em função da umidade do grão e da temperatura ambiente, para evitar processos irreversíveis de deterioração (FORNASIERI FILHO, 2007).

Na seqüência de colheita, secagem, armazenagem, manuseio e transporte, a secagem é um dos processos mais importantes (BROOKER et al., 1992) que tem por finalidade reduzir o teor de água do produto, a níveis adequados ao seu armazenamento, por determinado período de tempo. Essa redução deve ser feita, a um nível tal que o mesmo fique em equilíbrio com o ar ambiente, de maneira a preservar a aparência e a qualidade nutritiva dos grãos, como alimento, e sua viabilidade como semente.

A secagem é um 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 grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (YILBAS et al., 2003). Embora seja uma operação de rotina, em razão das grandes vantagens que apresenta tanto para a produção de grãos quanto de sementes, é um processo que tem de ser feito com muito cuidado, em virtude de ser também uma

operação de alto risco, visto que pode danificar seriamente a qualidade do produto em processamento (CARVALHO, 2005).

Quando inadequada, constitui a principal causa de deterioração de semente, podendo ser responsável pelo aumento da susceptibilidade à quebra dos grãos de milho, comprometendo a sua qualidade.

A antecipação da colheita pode proporcionar melhoria na qualidade das sementes de milho, por não deixá-las expostas à deterioração em campo. Melendez et al. (1992) relataram que as perdas aumentam com a diminuição do teor de água das sementes. Entretanto, outros autores, como Araújo (1995) e Silva (1997) concluíram que o efeito dos danos mecânicos sobre a qualidade das sementes de milho foi mais prejudicial quando foram colhidos com maior teor de água.

A temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem, a taxa de secagem do produto, o teor de água inicial e final do produto, o sistema de secagem empregado e o tempo de residência do produto na câmara de secagem, são os principais parâmetros que podem estar associados à redução da qualidade dos grãos e sementes durante a secagem (BROOKER et al., 1992).

Em estudos para avaliar o efeito da temperatura do ar de secagem e umidade inicial de colheita sobre a qualidade fisiológica e os danos mecânicos do milho, Franceschini (1997) observou que a suscetibilidade à quebra aumenta com a temperatura do ar de secagem, enquanto Peplinski et al. (1994) verificaram que a germinação era reduzida. Alves et al. (2001) relataram que a massa específica aparente dos grãos de milho diminuiu com o aumento da umidade dos grãos durante a colheita e da temperatura do ar de secagem. Além disso, o índice de trincas dos grãos de milho aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem e da umidade dos grãos durante a colheita.

Sob o ponto de vista tecnológico, o processamento de sementes envolve as mesmas operações aplicadas ao processamento de grãos comerciais. Entretanto, a metodologia de utilização desses processos deve apresentar conceitos diferentes daqueles pelo fato das sementes serem sistemas biológicos, cuja viabilidade deve ser preservada, exigindo-se, portanto, maiores cuidados na seleção dos sistemas operacionais e dos equipamentos de manejo.

Carvalho e Nakagawa (2000) consideram o beneficiamento parte essencial da tecnologia relativa à produção de semente de alta qualidade, a partir do material fornecido pelos melhoristas, pois o beneficiamento envolve todas as operações de

preparo das sementes pós colheita, tais como pré-limpeza, secagem, classificação, tratamento e embalagem. Em 1988, esses mesmos autores concluíram que as formas como a temperatura do ar de secagem pode danificar as sementes variam conforme a espécie e teor de água. Recomendaram 32°C para teores de umidade acima de 18%b.u., 38°C para aqueles entre 10 e 18%b.u. e 43,0°C para os inferiores a 10%b.u. Brooker et al. (1978) analisou a temperatura crítica de sementes de milho como função da umidade relativa de equilíbrio, encontrados os valores 52°C e 60%; 50°C e 70,0%; 48°C e 80% e 46°C e 90%.

Brooker et al. (1992) afirmaram que a temperatura máxima de exposição das sementes depende de seu teor de água e do tempo de exposição à temperatura aplicada, citando valores aos quais as sementes com 18%b.u. podem ser secadas à temperatura de 67°C; com 26%b.u. a 59°C. Informaram que estas temperaturas são consideradas altas para 43°C, comumente recomendada por alguns cientistas de sementes. Verificaram que as sementes de milho com 32%b.u., secadas à 65°C, mantiveram a viabilidade de 90%, quando a exposição durou 5 min.

A modelagem dos parâmetros que caracterizam a qualidade fisiológica das sementes tais como germinação e vigor, em função das condições do ar de secagem e teores de água inicial e final do milho, pode ser realizada e, em conjunto com o modelo matemático de simulação de secagem, auxiliar na análise e dimensionamento de sistemas de beneficiamento das sementes de milho buscando sua máxima qualidade.

A utilização de modelos matemáticos, para simular o processo de secagem em secadores que operam em alta temperatura, tem-se tornado uma ferramenta importante para os engenheiros que trabalham na área de secagem e armazenagem de grãos e sementes (QUEIROZ et al., 1999). Com esses modelos, pode-se prever os parâmetros que caracterizam o processo de secagem facilitando a tomada de decisão sobre quais configurações são recomendadas para a secagem em diversas condições locais e diferentes tipos de secadores encontrados no mercado.

Este trabalho é formado por dois artigos. O primeiro envolve o estudo e a modelagem da cinética de secagem de milho em camada delgada. O segundo artigo foi realizado, visando modelar o processo de secagem de milho em secador de leito fixo com distribuição radial do ar.

O objetivo deste trabalho foi modelar e simular a secagem de sementes de milho em secador de leito fixo com distribuição radial do ar, feita na região da Grande Dourados-MS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, W.M.A.; FARONI, L.R.D.; QUEIROZ, D.M.; CORRÊA, P.C.; GALVÃO, J.C.C. Qualidade de grãos de milho em função da umidade de colheita e temperatura de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. PB. v.5, n.3, 469-474p. 2001.

ARAÚJO, R.F. **Efeito da colheita mecanizada nas perdas quantitativas e qualitativas de sementes de milho (*Zea mays* L.)**. Viçosa: UFV, 1995. 103p. (Tese de Doutorado)

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.M. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992. 450p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Grain quality deterioration. In: \_\_\_\_\_. **Drying cereal grain**. 2.ed. Westport: The Avi Publishing Company, Inc., 1978, p.49-68.

CARVALHO, N.M. **A secagem de sementes**. Funep. Jaboticabal. 2005. 184p.

CARVALHO, N.M., NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 3.ed. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 424p.

CARVALHO, N.M., NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4.ed. Jaboticabal: Funep, 2000. 588p.

CONAB. (2009). **Acompanhamento da Safra 2008/2009**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 12/06/2009.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576p.

FRANCESCHINI, A.S. **Danos mecânicos, qualidade fisiológica e desenvolvimento populacional de *Tribolium* spp. em milho híbrido BR 201, submetido a diferentes condições de secagem**. Viçosa: UFV, 1997. 72p. (Tese de Mestrado)

MELLENDEZ, J.; GRENOVERO, S.; CAPELLACCI, H. Anticipated maize harvest in Entre Rios province. In: Congresso Argentino de Ingeniería Rural, 2, 1992, Villa Maria, Argentina. **Resumo...** Villa Maria, AR: Univ. Tec. Nacional; Unidad Acad. Villa Maria, 1992. p.101.

PEPLINSKI, A.J.; PAULIS, J.W.; BIETZ, J.A.; PRATT, R.C. Drying of high-moisture corn: Changes in properties and physical quality. **Cereal Chemistry**, St. Paul, Minnesota, v.71, n.2, p.129-133, 1994.

QUEIROZ, D.M.; CORRÊA, P.C.; SOUZA, C.M.A. SIMSEC – Um programa para simulação de secagem. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-COLHEITA, 1, Porto Alegre, 1999. **Anais**. Passo Fundo: Abrapós; Cesa; Embrapa Trigo, 1999. p.248.

SILVA, A.A.L. Desenvolvimento de um índice para avaliação de danos mecânicos em grãos de milho. *Engenharia na Agricultura, Viçosa*, v.5, n.3, p.244-253, 1997.

YILBAS, B.S.; HUSSAIN, M.M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v.39, p.471–476, 2003.

## CINÉTICA DE SECAGEM DE MILHO EM CAMADA DELGADA

### RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estudar e modelar a cinética de secagem em camada delgada de grãos de milho, bem como ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais, aos dados observados. Além disso, objetivou-se determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para a faixa de temperatura de secagem de 40 a 70°C. Foram utilizados grãos de milho da variedade DKB 979, colhidas e debulhadas manualmente com um teor de água de aproximadamente 35% b.s. Os grãos foram submetidos à secagem sob condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C), até que o produto atingisse teor de água de aproximadamente 11% b.s.. Aos dados experimentais foram ajustados seis modelos tradicionais citados na literatura para a representação do processo de secagem em camadas delgadas de produtos agrícolas. Também se procedeu a determinação do coeficiente de difusão efetivo por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida. De acordo com os resultados encontrados verificou-se que todos os modelos estudados (Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis, Midilli, Page e Newton) foram satisfatórios. Verificou-se que o aumento da temperatura promove maior taxa de remoção de água dos grãos de milho; em geral, os valores da constante  $k$  aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem. A relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de grãos de milho de 31,54 kJ mol<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** *Zea mays* L., modelagem matemática, umidade.

## CORN DRYING KINETICS IN THIN LAYER

### ABSTRACT

The actual work aimed to study and model the corn drying kinetics in thin layer of corn grains, as well as adjusts different mathematical models to the experimental ratings and observed data. Besides, it was aimed to determine the effective

diffusion coefficient and activation energy for the drying temperature range from 40 to 70°C. DKB 979 corn grains were used; they were manually harvested and threshed with moisture at about 35% db. The grains were submitted to drying under temperature controlled conditions (40, 50, 60 and 70°C), until the product reached moisture at about 11% db. To the experimental data, they were adjusted six traditional models mentioned in literature, for the representation of the drying process in thin layers of farm products. It was also come the determination of the effective diffusion coefficient through adjustment of the mathematical model of liquid diffusion. According to the found results, it was noticed that all the studied models (Two Terms, Exponential Two terms, Henderson and Pabis, Midilli, Page and Newton) were satisfactory. It could be confirmed that the temperature increase makes a bigger water removal rate from the corn grains; in general, the constant k ratings increased with the drying air temperature rise. The effective diffusion coefficient increases with the drying air temperature rise. The relation between the diffusion coefficient and drying temperature can be described through Arrhenius equation, that shows activation energy for the liquid diffusion during the corn grains drying of 31,54 kJ mol<sup>-1</sup>.

**Key words:** *Zea mays*L., mathematical modeling, moisture content.

## INTRODUÇÃO

A secagem é a operação que tem por finalidade reduzir o teor de água do produto, a níveis adequados ao seu armazenamento, por determinado período de tempo. A conservação pela secagem baseia-se no fato de que tanto os microrganismos como as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de água para suas atividades e com a redução da quantidade de água disponível até níveis seguros para armazenagem, serão reduzidos a atividade de água, a velocidade das reações químicas no produto e o desenvolvimento de microrganismos.

O processo de secagem realizado de maneira artificial é apontado por vários pesquisadores como um dos principais problemas de produção de sementes. Além de ser o processo mais utilizado para possibilitar a preservação da qualidade dos produtos agrícolas, a secagem pode ser vista, também, como a operação que permite obter sementes de melhor qualidade, possibilitando colheitas antecipadas, além de evitar as deteriorações que poderiam ocorrer no campo.

Quando inadequada, a secagem constitui a principal causa de deterioração de sementes. Ela pode ser responsável pelo aumento da susceptibilidade à quebra dos grãos de milho, comprometendo a sua qualidade. Segundo Brooker et al. (1992), a secagem requer mais de 60,0% do total de energia utilizada na produção, enquanto os tratamentos culturais consomem 16,0%, o plantio e cultivos 12,0%, a colheita 6,0% e o transporte 6,0%.

A temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem, a taxa de secagem do produto, o teor de água inicial e final do produto, o sistema de secagem empregado e o tempo de residência do produto na câmara de secagem, são os principais parâmetros que podem estar associados à redução da qualidade dos grãos e sementes (Brooker et al., 1992), e a ausência do controle desses fatores pode afetar a qualidade do produto final.

Para o desenvolvimento ou aperfeiçoamento de equipamentos utilizados na secagem de sementes, torna-se importante a simulação e a obtenção de informações a respeito do comportamento de cada produto durante o processo de remoção da água. O princípio da simulação se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utilizando-se um modelo matemático que represente satisfatoriamente a perda de água do produto durante o processo de secagem (BERBERT et al., 1995).

A secagem em camada delgada é definida como aquela com a espessura de apenas uma unidade do produto. A equação de secagem em camada delgada, combinada com as equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto em estudo, forma um conjunto de relações matemáticas que auxiliam nos cálculos e no entendimento dos processos de secagem em camada espessa. Considera-se que uma camada espessa seja constituída de uma sucessão de camadas delgadas superpostas (KASHANINEJAD et al., 2007).

Para descrever o processo de secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos, que são geralmente baseados no fenômeno de transferência de calor e de massa. Os modelos empíricos e semi-teóricos são baseados na lei de Newton, para o resfriamento, aplicados à transferência de massa. Quando se aplica essa lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja à superfície.

O modelo teórico considera apenas a resistência interna à transferência de calor e água entre o produto e o ar quente, já os modelos semi-teóricos e os empíricos consideram somente a resistência externa à temperatura e à umidade relativa do ar de



secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002). Entre os empíricos, o modelo que tem sido mais testado em estudos de cinética de secagem de produtos agrícolas é o modelo proposto por Thompson et al. (1968).

Segundo afirmações de Brooker et al. (1992), as relações empíricas têm-se mostrado as melhores opções para predizer o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos.

Afonso Júnior e Corrêa, (1999); Corrêa et al., (2003); Corrêa et al., (2007); Goneli (2008), Resende et al., (2009) têm encontrado melhores ajustes utilizando os modelos semi-teóricos para a representação da cinética de secagem em camada delgada de produtos agrícolas. Dentre eles, os modelos de Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Logarítmico, Aproximação da difusão, Dois termos e Exponencial de dois Termos.

Dentre os modelos teóricos que são aplicados ao processo de secagem, o modelo da difusão é o mais estudado. 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, que descreve que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 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 (BARBOSA- CÁNOVAS e VEJA-MERCADO, 2000).

O mecanismo da difusão líquida é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção (CORRÊA et al., 2006). Geralmente, o coeficiente de difusão efetivo é utilizado devido à pouca informação referente à forma de movimento da água durante a secagem, além da complexidade do processo (GONELLI, 2008). O autor relata que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o incremento da temperatura do ar de secagem, para um mesmo valor de umidade relativa. A dependência do coeficiente de difusão com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (GONELI et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007;

MARTINAZZO et al., 2007; RESENDE et al., 2007; RESENDE et al., 2005; MADAMBA et al., 1996).

Sabe-se que o coeficiente de difusão de água nos produtos agrícolas depende da energia de ativação, sendo esta uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto (KASHANINEJAD et al., 2007).

Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo estudar e modelar a cinética de secagem em camada delgada de grãos de milho, além de ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais em função do tempo de secagem, bem como determinar o coeficiente de difusão e a energia de ativação para a faixa de temperatura de 40 a 70°C.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Sementes da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no município de Dourados, estado de Mato Grosso do Sul (MS).

Foram utilizados grãos de milho (*Zea mays* L.) híbrido Dekalb 979, provenientes da Fazenda Capão Verde, localizada no município de Ponta Porã-MS. Foram monitorados os ciclos da cultura para evitar influências sobre os resultados e a fim de obter produtos com a máxima qualidade e homogeneidade. As espigas foram colhidas e debulhadas manualmente com o propósito de garantir a qualidade e evitar possíveis danos mecânicos.

Após a debulha, os grãos apresentaram teor de água de aproximadamente 35% b.s.. Posteriormente, elas foram colocadas em sacos de polietileno e acondicionadas em câmara climática à temperatura de  $3 \pm 2^\circ\text{C}$ . Para homogeneizar a temperatura das amostras, as mesmas foram retiradas da câmara climática e mantidas à temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas antes da realização de cada experimento de secagem. Os teores de água do produto foram determinados pelo método de estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24 horas, em duas repetições (BRASIL, 1992).

Para a secagem dos grãos, controlaram-se as condições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Essas condições foram obtidas por meio de uma estufa com circulação e renovação de ar, modelo 310/49/PID, sendo essas condições do ar de secagem apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Condições de temperatura e umidade relativa do ar utilizadas na secagem dos grãos de milho

Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)
40 ± 1	32 ± 3
50 ± 1	15 ± 3
60 ± 1	10 ± 3
70 ± 1	4 ± 1

Para permitir a passagem do ar pelo produto, foram utilizadas bandejas removíveis com fundo telado, contendo grãos de milho, em três repetições. A temperatura do ar foi monitorada por meio de termômetro digital com resolução de 0,1°C, instalado no interior da estufa.

Durante a operação de secagem, foram realizadas pesagens periódicas das amostras em balança semi-analítica, com resolução de 0,01g, até que os grãos de milho atingissem o teor de água final de, aproximadamente, 11% b.s.. A definição desses teores serviu para a determinação das curvas de secagem e ajuste dos modelos.

Para a determinação da razão de umidade dos grãos de milho para as diferentes condições de secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RU = \frac{U_{\theta} - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

em que,

RU - razão de umidade do produto, adimensional;

$U_{\theta}$  - teor de água do grão de milho no tempo  $\theta$ , decimal b.s.;

$U_i$  - teor de água inicial, decimal b.s.;

$U_e$  - teor de água de equilíbrio, decimal b.s.

Aos dados experimentais da secagem dos grãos de milho, foram ajustados seis modelos matemáticos frequentemente utilizados para a representação da secagem de produtos agrícolas (AFONSO JUNIOR e CORRÊA, 1999; CORRÊA et al., 2003; CORRÊA et al., 2007; RESENDE et al., 2009), cujas equações estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas

<b>Designação do modelo</b>	<b>Modelo</b>	
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(2)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	(3)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$	(4)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(5)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$	(6)
Newton	$RU = a \exp(-k t)$	(7)

em que,

$k, k_0$  e  $k_1$  - constantes de secagem,  $h^{-1}$ ;

$a, b$  e  $n$  - coeficientes dos modelos;

$t$  - tempo de secagem,  $h$ .

Para ajuste dos modelos matemáticos, foram feitas análises de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton. O grau de ajuste de cada modelo considerou a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do erro absoluto relativo médio (P) e do desvio padrão da estimativa (SE). O erro absoluto relativo médio e o desvio padrão da estimativa para cada um dos modelos foram calculados conforme as equações:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (8)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (9)$$

em que,

$Y$  - valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  - valor calculado pelo modelo;

$N$  - número de observações experimentais;

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

### Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 10, aos dados experimentais da secagem dos grãos de milho. 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 produto (BROOKER et al., 1992).

$$RU = \frac{U_{\theta} - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ -\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{9} \left( \frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (10)$$

em que,

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

$R_e$  - raio equivalente, m;

n - número de termos;

A solução analítica dessa equação apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento poderá determinar a precisão dos resultados.

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), como proposto por Mohsenin (1986), em cinquenta grãos após a secagem, com auxílio de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm. O volume de cada grão (V), considerado como um elipsóide, foi obtido utilizando-se a seguinte expressão:

$$V = \frac{\pi(lw\theta)}{6} \quad (11)$$

em que,

l - eixo maior do grão (comprimento), mm;

w - eixo médio do grão (largura), mm;

$\theta$  - eixo menor do grão (espessura), mm.

### Influência da temperatura

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_{ef} = D_o \exp\left(\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (12)$$

em que,

$D_o$  - fator pré-exponencial,  $m^2 s^{-1}$ ;

$E_a$  - energia de ativação,  $kJ mol^{-1}$ ;

$R$  - constante universal dos gases,  $8,314 kJ kmol^{-1} K^{-1}$ ; e

$T_a$  - temperatura absoluta, K.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, são apresentados, respectivamente para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio-padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P, em %) para os seis modelos analisados para a secagem dos grãos de milho, nas diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

TABELA 3. Parâmetros estatísticos obtidos para os seis modelos de secagem, para a temperatura de 40°C

Modelo	$R^2$	SE	P
Dois termos	1,0000	0,0012	0,1737
Exponencial de Dois Termos	0,9908	0,0193	3,2590
Henderson e Pabis	0,9995	0,0135	2,1129
Midilli	0,9999	0,0002	0,2525
Page	0,9996	0,0040	0,5284
Newton	0,9908	0,0191	3,2590

TABELA 4. Parâmetros estatísticos obtidos para os seis modelos de secagem, para a temperatura de 50°C

Modelo	R <sup>2</sup>	SE	P
Dois termos	0,9995	0,0055	0,5179
Exponencial de Dois Termos	0,9993	0,0060	0,7423
Henderson e Pabis	0,9995	0,0053	0,5178
Midilli	0,9998	0,0038	0,5344
Page	0,9995	0,0049	0,6242
Newton	0,9985	0,0088	1,0587

TABELA 5. Parâmetros estatísticos obtidos para os seis modelos de secagem, para a temperatura de 60°C

Modelo	R <sup>2</sup>	SE	P
Dois termos	0,9971	0,0139	1,5937
Exponencial de Dois Termos	0,9995	0,0050	0,5569
Henderson e Pabis	0,9971	0,0127	1,5937
Midilli	0,9998	0,0032	0,4386
Page	0,9998	0,0034	0,4206
Newton	0,9939	0,0176	2,5323

TABELA 6. Parâmetros estatísticos obtidos para os seis modelos de secagem, para a temperatura de 70°C

Modelo	R <sup>2</sup>	SE	P
Dois termos	0,9950	0,0195	2,0695
Exponencial de Dois Termos	0,9953	0,0167	1,5613
Henderson e Pabis	0,9950	0,0172	2,0695
Midilli	0,9954	0,0187	1,3831
Page	0,9953	0,0167	1,6279
Newton	0,9947	0,0168	2,2250

Analisando-se os dados das Tabelas 3, 4, 5 e 6 pode-se observar que para todas as condições de temperatura utilizadas na secagem dos grãos de milho, todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) superiores a 0,99, indicando uma representação satisfatória do comportamento do processo de secagem (CORRÊA et al., 2007; GONELI, 2008). Para todas as condições testadas, todos os modelos matemáticos obtiveram magnitude do erro absoluto relativo médio inferior a 10%, valores que Mohapatra e Rao (2005) relataram que são recomendados para a seleção de modelos. Os valores do erro médio relativo (P) indicam o desvio dos valores observados em relação a curva estimada pelo modelo (KASHANINEJAD et al., 2007).

Ainda analisando os dados das Tabelas 3, 4, 5 e 6 pode-se observar que todos os modelos ajustaram-se e descreveram satisfatoriamente o processo de secagem, apresentando reduzidas magnitudes do desvio padrão da estimativa. Segundo Draper e Smith (1998) a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio-padrão da estimativa.

Assim, verifica-se que dentre todos os modelos testados e de acordo com os parâmetros estatísticos obtidos os modelos de Page e Midilli, podem ser indicados para a representação da cinética de secagem em camada delgada de grãos de milho. Devido a simplicidade do modelo de Page, por apresentar um menor número de parâmetros, facilitando a sua aplicação e uso em simulações de secagem e diante das condições em que esse trabalho foi realizado, selecionou-se o modelo de Page para representar a



cinética de secagem de sementes de milho em camada delgada. Diversos pesquisadores também recomendaram o modelo de Page para prever o fenômeno de secagem de vários produtos agrícolas: feijão (AFONSO JUNIOR e CORRÊA, 1999; CORRÊA et al., 2007), milho doce (CORRÊA et al., 2003), mamona (GONELI, 2008), café (RESENDE et al., 2009), dentre outros.

Na Figura 1 são apresentadas, para todas as condições de secagem estudadas, comparações entre os valores observados e os estimados, pelo modelo de Page, da razão de umidade dos grãos de milho durante a secagem em camada delgada.

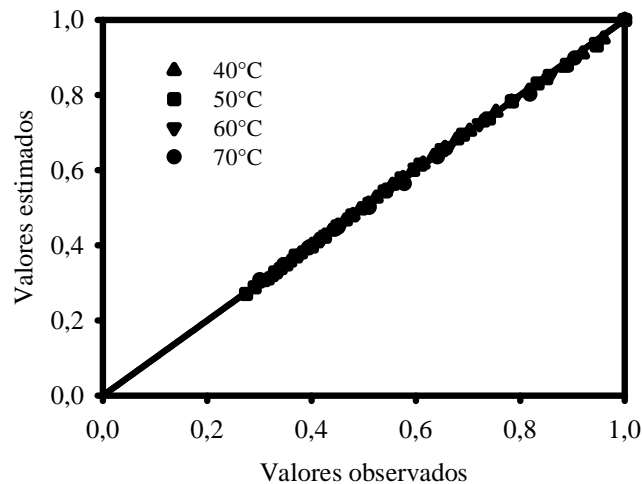


FIGURA 1. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem de grãos de milho.

É possível se observar na Figura 1 o bom ajuste do modelo de Page aos dados observados, que representa adequadamente a cinética de secagem dos grãos de milho.

Na Figura 2, são apresentadas as curvas de secagem em camada delgada dos grãos de milho, com os valores observados e estimados pelo modelo de Page. As curvas de secagem estão representadas em função do tempo e das temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70°C.

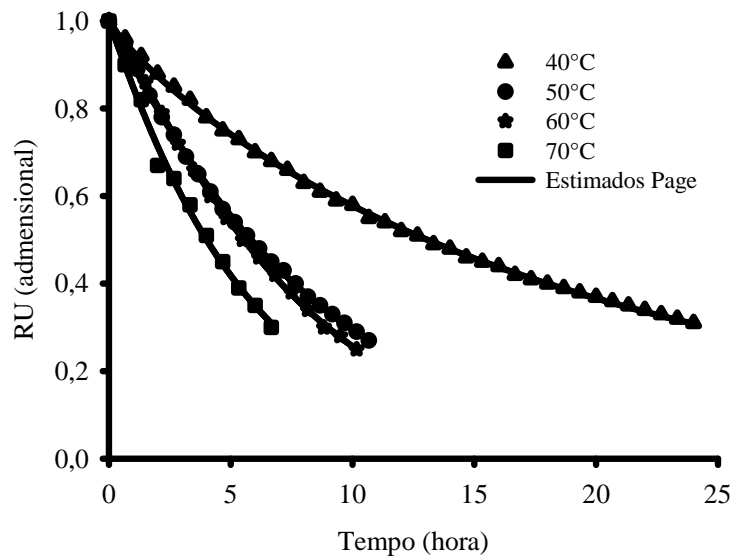


FIGURA 2. Valores observados e estimados pelo modelo de Page, da razão de umidade durante a secagem dos grãos de milho, para as respectivas temperaturas.

Verifica-se na Figura 2 o ajuste adequado do modelo de Page para todas as temperaturas consideradas no presente trabalho. Na medida em que se utilizam temperaturas mais elevadas do ar de secagem se eleva também a taxa de remoção de água do produto, bem como se diminui o tempo necessário para secagem.

Por outro lado, quando se utilizou a temperatura do ar de secagem de 40°C, verificou-se um tempo demasiado longo para diminuição de RU sem, contudo atingir os teores de 11% b.s., teor esse considerado adequado para o armazenamento seguro do produto. Baudet (2003) considera 13% o teor de água recomendado para o armazenamento de grãos de milho para que não ocorram perdas na germinação, entretanto deve-se considerar esses teores de água quando se pretende armazenar o produto por um período de até doze meses. Além disso, seriam necessárias avaliações econômicas que considerem o tempo gasto e os custos de energia envolvidos na operação de secagem.

Observa-se ainda na Figura 2, que para todas as temperaturas estudadas a secagem dos grãos se faz a uma taxa decrescente, sendo cada vez mais lenta à medida que passa o tempo, o que está de acordo com Carvalho (2005), indicando que ocorre uma maior resistência a transferência de calor e massa do interior do produto para sua superfície (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na Tabela 7 são apresentados os coeficientes do modelo de Page ajustados aos dados observados da cinética de secagem em camada delgada de grãos de milho para as quatro temperaturas do ar de secagem.

TABELA 7. Parâmetros do modelo de Page para diferentes condições de secagem dos grãos de milho.

Temperatura	k (h <sup>-1</sup> )	n (adimensional)
40°C	0,0733	0,8734
50°C	0,1084	1,0521
60°C	0,0995	1,1349
70°C	0,1633	1,0409

Na Tabela 7 observa-se que a magnitude da constante de secagem (k), que representa o efeito das condições externas de secagem, aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, com exceção da temperatura de 60°C. Possivelmente esse fato está relacionado com a umidade relativa ambiente que durante a secagem a 60°C foi (63%) superior àquela (59%) ocorrida na secagem de 50°C. Segundo Babalis e Belessiotis (2004), 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. Com relação ao coeficiente n do modelo de Page, que reflete a resistência interna do produto à secagem, em geral, também se pode observar aumento em seus valores na medida em que se eleva a temperatura do ar de secagem.

No Tabela 8 são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão obtidos durante a secagem dos grãos de milho nas diferentes condições de temperatura do ar de secagem. O coeficiente de difusão efetivo, assumindo-se a forma geométrica elíptica e raio equivalente de 4,03 mm, foi obtido por meio de regressão não linear utilizando-se a Equação 8, com aproximação de oito termos.

TABELA 8. Coeficientes de difusão efetivo ajustados as diferentes condições de secagem em camada delgada dos grãos de milho

Temperatura (°C)	$D \times 10^{-9} \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$
40	0,3757
50	0,8617
60	0,9348
70	1,2037

Analisando-se os dados da Tabela 8, observa-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem. Segundo Goneli (2008), com o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e sendo a viscosidade uma medida de resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam alterações na difusão da água nos capilares dos grãos, de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto. Além disso, outro fator que pode ser atribuído a essa variação do coeficiente de difusão efetivo é que, com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida.

Durante a secagem dos grãos de milho, os coeficientes de difusão apresentaram magnitudes entre  $0,37569 \times 10^{-9}$  e  $1,20372 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , utilizando o raio equivalente inicial dos grãos, para a faixa de temperatura de 40 a 70°C. Os valores do coeficiente de difusão calculados para os grãos de milho estão coerentes com os relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996) apresentam-se na ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . A dependência do coeficiente de difusão com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (GONELI, 2008; CORRÊA et al., 2007; MARTINAZZO et al., 2007; RESENDE et al., 2007; MADAMBA et al., 1996).

Na Figura 3 são apresentados os valores de  $\ln(D_{ef})$  em função do inverso da temperatura absoluta ( $1/T_a$ ).

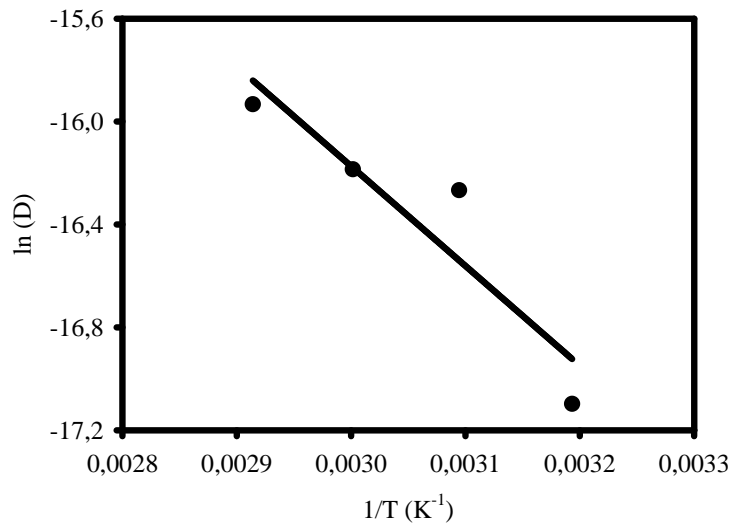


FIGURA 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura do ar de secagem, durante a secagem dos grãos de milho.

A inclinação da curva de representação de Arrhenius fornece a relação  $E_a/R$ , enquanto a sua interseção no eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ . A Equação 13 apresenta os coeficientes da equação ajustada para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de milho, calculados de acordo com a Equação 10.

$$k = 1,0673 \times 10^{-2} \exp\left(-\frac{31.541,2931}{R T_a}\right) \quad (13)$$

Como pode ser observada na Equação 13 a energia de ativação para a difusão líquida dos grãos de milho foi de aproximadamente  $31,54 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto. A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na Tabela 9 são apresentados os valores de energia de ativação obtidos por diversos autores, trabalhando com os mais diferentes produtos agrícolas. Segundo Goneli (2008) e Zogzaz et al. (1996), a energia de ativação para os produtos agrícolas varia entre  $12,7$  a  $110 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

TABELA 9. Energia de ativação ( $E_a$ ) para diversos produtos agrícolas

Produto	$E_a$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	Referência
Milho	31,54	Presente estudo
Mamona	15,25	Goneli (2008)
Feijão vermelho	40,08	Resende et al. (2007)
Folhas de capim limão	63,47	Martinazzo et al. (2007)
Nozes de pistachio	30,79	Kashaninejad et al. (2007)
Semente de abóbora	33,15	Sacilik (2007)
Semente de quinoa	37,98	Gelly e Santalla (2007)
Soja (secadas abaixo de 50°C)	16,60	Gely e Giner (2007)
Soja (secadas acima de 50°C)	28,80	Gely e Giner (2007)
Trigo	42,00	Goneli et al. (2007)
Arroz em casca	34,80	Resende et al. (2005)
Trigo parbolizado	27,01	Mohapatra e Rao (2005)

## CONCLUSÕES

Todos os modelos testados no presente trabalho foram satisfatórios para representar o processo de secagem dos grãos de milho, tendo sido o modelo de Page selecionado para descrever a cinética de secagem de grãos de milho em camada delgada. Em geral, os valores das constantes  $k$  e  $n$  aumentaram à medida em que se eleva a temperatura do ar de secagem.

A relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem pode ser descrita pela Equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de grãos de milho de 31,54 kJ mol<sup>-1</sup>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada delgada de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, 349-353p, 1999.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65,449-458p, 2004.
- BAROBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H. **Deshidratación de alimentos**. Ed. Acribia S.A. 2000, 297p.
- BAUDET, L. Armazenamento de Sementes. In: PESKE, S.T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. (Ed.) **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas: UFPel, 370-416p, 2003.
- BERBERT, 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**, v.60, p.167-173, 1995.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 365p.
- 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.
- CARVALHO, N.M. **A secagem de sementes**. Funep. Jaboticabal. 2005. 184p.
- CORRÊA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; AFONSO JÚNIOR, P.C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays*L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, 110-119p, 2003.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n.2, p.117-126, 2006.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**.: John Wiley & Sons, 3th edition, New York, 1998. 712 p.
- F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris*L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, 501-507p, 2007.
- GELY, M.C.; GINER, S.A. Diffusion coefficient relationships during drying of soya bean cultivars. **Biosystems Engineering**, v.96, 213-222p, 2007.

GELY, M.C.; SANTALLA, E.M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **Journal of Food Engineering**, v.78, 1029-1033p, 2007.

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

GONELI, A.L.D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da Mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento.** 2008. 186p. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

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

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**, v.11, 301-306p, 2007.

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

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

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

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**, v.51, p.193-199, 2002.

RESENDE, O.; ARCANJO, R.V.; SIQUEIRA, V.C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum. Agronomy**. Maringá, v.31, n.2, 189-196p, 2009.

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

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



SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, v.79, 23-30p, 2007.

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

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

## **MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DE MILHO EM SECADOR COM DISTRIBUIÇÃO RADIAL DO AR**

### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi implementar um modelo matemático de simulação do processo de secagem de grãos de milho e realizar testes experimentais para obter a validação do modelo. Um programa computacional foi desenvolvido em linguagem de programação MS Visual Basic, versão 6. O leito de grãos foi considerado como formado por várias camadas com espessuras reduzidas, colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e do grão, em cada camada, foram calculadas com base em pequenos incrementos de tempo. O modelo considera algumas pressuposições: a secagem de uma camada delgada de produto pode ser descrita por uma equação obtida empiricamente; a temperatura do grão é igual à temperatura do ar que a envolve, após os balanços de energia, que levam em conta o resfriamento proveniente da evaporação da água do produto e das temperaturas dos grãos e do ar; o teor de água de equilíbrio dos grãos depende da temperatura e da umidade relativa do ar nas vizinhanças destas; a entalpia de vaporização da água nos grãos depende da temperatura e do teor de água destas; a entalpia específica dos grãos depende do teor de água. O modelo matemático implementado para a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar, mostrou-se viável, apresentou precisão satisfatória e é válido para simular a secagem de milho.

**Palavras-chave:** *Zea Mays* L., leito fixo, simulação.

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE CORN DRYING PROCESS IN DRYER WITH AIR RADIAL DISTRIBUTION**

### **ABSTRACT**

The aim of this work was to implement a simulation mathematical model of the corn drying process and perform experimental tests to get the model validation. A software was developed in MS Visual Basic programming language. The bed seed was formed by several layers with reduced thickness, and overlapping one another. The variations on air and seed conditions, in each layer, were calculated based on time small increments. The model considers some assumptions: the drying of a product thin layer

can be explained through an equation empirically obtained; the product temperature is the same to the air that it's surrounded, after the energy balances, that considers the cooling that comes from the product water evaporation and the grains and air temperatures; the moisture of product balance depends on the temperature and air relative humidity in their own neighbors; the water vaporization enthalpy in product depends on the temperature and the moisture of these ones; the product specific enthalpy depends on the moisture. The implemented mathematical model for the corn drying in dryer with air radial distribution was feasible, showed satisfactory accuracy and is valid to simulate the corn drying.

**Key words:** *Zea mays*L., fixed bed, simulation.

## INTRODUÇÃO

O milho é um dos principais cereais cultivados no mundo, fornecendo produtos para a alimentação humana e animal e matéria prima para a indústria. No Brasil, a cultura ocupa posição significativa na economia, em decorrência do valor da produção agropecuária, da área cultivada e do volume produzido, especialmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

De acordo com o 9º levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB realizado em Junho de 2009, a produção nacional de milho deverá atingir aproximadamente 50 milhões de toneladas. No ano de 2008 a região Centro-Oeste foi responsável por 48% do milho produzido no Brasil.

Apesar de toda a capacidade produtiva do Brasil, muito ainda tem que ser feito para melhor se atender à exigência dos mercados nacional e internacional quanto à qualidade do produto, preocupação primordial, fazendo com que as práticas adotadas da colheita ao armazenamento, sejam as mais adequadas (ALVES et al., 2001).

A obtenção de produtos de alta qualidade depende de diversos fatores, como: características da espécie e da variedade, condições ambientais durante o seu desenvolvimento, época e procedimento de colheita, método de secagem e práticas de armazenagem. Quando inadequada, a secagem constitui a principal causa de deterioração de sementes (BROOKER et al., 1992).

O momento ideal de colheita deveria ser quando a semente atinge a maturidade fisiológica, pois nesse instante é que cessa a transferência de matéria seca da planta para

as sementes e nessa ocasião, as mesmas apresentam potencial fisiológico elevado. Entretanto, nesse momento as sementes se encontram com altos teores de água dificultando o manejo mecanizado, principalmente no que se refere ao recolhimento, debulha e a ocorrência de danos severos de injúrias mecânicas por amassamento das sementes (MARCOS FILHO, 2005).

A colheita antecipada permite evitar a exposição das sementes por períodos relativamente prolongados a condições menos favoráveis do ambiente. No entanto, em virtude do elevado teor de água torna-se indispensável a realização do processo de secagem.

Dentre os métodos utilizados para conservação de grãos e sementes, a secagem é o mais econômico não só sob o ponto de vista de processamento, mas, também por permitir a preservação do produto em ambiente natural durante um longo período de tempo (SOUZA et al., 2002).

O processo de secagem realizado de maneira artificial é apontado por vários pesquisadores como uma das principais maneiras de conservação de sementes e alimentos. Este processo é um dos principais pontos de estrangulamento do sistema de pós-colheita e requer grande quantidade de energia para sua realização, podendo chegar a atingir até 60,0% do total de energia utilizada na produção (BROOKER et al., 1992). As características do ar de secagem e as dimensões dos secadores influenciam diretamente o desempenho do mesmo e a qualidade do produto por ele secado (SOUZA et al., 2007).

Além de ser o processo mais utilizado para possibilitar a preservação da qualidade dos produtos agrícolas, a secagem pode ser vista, também, como a operação que permite obter sementes de melhor qualidade, possibilitando colheitas antecipadas, além de evitar as deteriorações que poderiam ocorrer no campo (TOLEDO e MARCOS FILHO, 1977; ROSSI e ROA, 1980).

A produção de sementes de qualidade é muito importante dentro do processo de produção agrícola, pois se bem executada ela permite obter estandes uniforme e boa distribuição de plantas no campo.

A utilização de modelos matemáticos, para simular o processo de secagem em secadores, tem-se tornado uma ferramenta importante para os engenheiros que trabalham na área de secagem e armazenagem de grãos (QUEIROZ et al., 1999; SOUZA et al., 2002).

Vários pesquisadores utilizaram modelos matemáticos para descreverem a secagem de diferentes materiais biológicos, tais como: cenoura (CONDE, 2004), inhame (FIOREZE e MORINI, 2000), raspa de mandioca (SILVA, 2000), uva, pêssego, figo e ameixa (TOGRUL e PEHLIVAN, 2004), tomates (HAWLADER et al., 1991), figos (BABALIS e VELESSIOTIS, 2004), feijão (CORRÊA et al., 2007; ANDRADE et al., 2006; MANCINI et al., 2002), milho-doce (ARAÚJO et al., 2001), lichia (ACHARIYAVIRIYA e PUTTAKARN, 2003), abacaxi (RODRIGUES et al., 2008), milho (THOMPSON et al., 1968) e milho em espiga (SOUZA et al., 2002), café (PÉREZ-ALEGRÍA e CIRO-VELÁSQUEZ, 2001; QUEIROZ et al., 2001), poupa de caju (MOURA et al., 2004), entre outros.

A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de secagem e do produto a ser secado apresenta-se como ferramenta útil no desenvolvimento de secadores eficientes (SOUZA et al., 2002), buscando a melhoria da qualidade do produto e otimização energética do processo.

Este trabalho teve por objetivo implementar um modelo matemático de simulação do processo de secagem de milho e realizar testes experimentais para obter os dados a serem utilizados na validação do modelo.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi realizado na Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados e em uma unidade de beneficiamento de sementes da empresa Sementes Guerra ME, localizada no município de Dourados, no Estado do Mato Grosso do Sul, e foi realizado em escala comercial. O clima regional classificado pelo sistema internacional de Köeppen é do tipo Cwa, clima úmido e inverno seco, com precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média anual de 22°C (MATO GROSSO DO SUL, 1990).

Um programa computacional orientado a objetos, com interface do usuário amigável e flexível foi desenvolvido para simular o processo de secagem de milho. A linguagem de programação MS Visual Basic foi utilizada no desenvolvimento do programa computacional.

Um modelo matemático foi implementado, com base no proposto por Thompson et al. (1968), para simular a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar

de secagem. Nesse modelo foi utilizada, como artifício, a divisão do processo de secagem em vários subprocessos. O leito de grãos foi considerado como formado por várias camadas com espessuras reduzidas, colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e do grão, em cada camada, foram calculadas com base em pequenos incrementos de tempo.

A Figura 1 apresenta um esquema ilustrando como ocorreram as variações consideradas na simulação de secagem de uma camada de espessura reduzida, que compõe um leito de grãos. Quando o ar passa pela camada fina, durante determinado intervalo de tempo, certa quantidade de água do produto é evaporada, passando para o ar. Nesse intervalo, a temperatura do ar diminui, em conseqüência da transferência de calor sensível do ar para o aquecimento do grão, e do calor latente fornecido para evaporação parcial da água do produto. Assim, a quantidade de água perdida pelo produto é calculada por meio de uma equação empírica de secagem em camada delgada. As temperaturas finais do ar e do grão, consistentes com o resfriamento evaporativo, são obtidas por meio de balanços de energia.

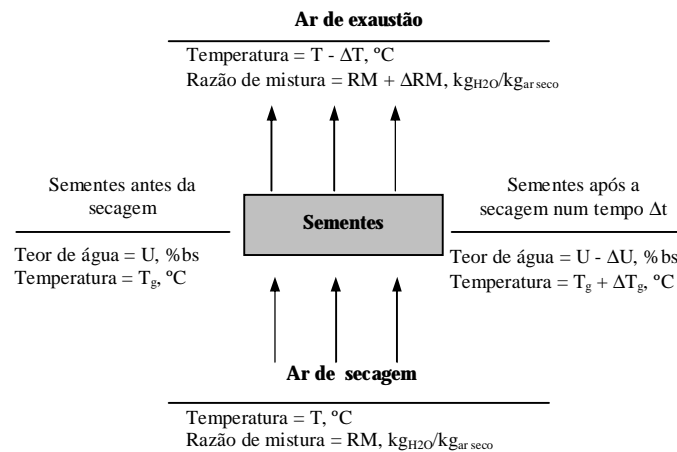


FIGURA 1. Esquema das variações decorrentes do processo de secagem em camada delgada durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Para desenvolver o modelo foram feitas as seguintes suposições: a secagem de uma camada delgada de produto pode ser descrita por uma equação obtida empiricamente; a temperatura do grão é igual à temperatura do ar que a envolve, após os balanços de energia, que levam em conta o resfriamento proveniente da evaporação da água do produto e das temperaturas dos grãos e do ar; o teor de água de equilíbrio dos

grãos depende da temperatura e da umidade relativa do ar nas vizinhanças destas; a entalpia de vaporização da água nos grãos depende da temperatura e do teor de água destas; a entalpia específica dos grãos depende do teor de água.

Para determinar a temperatura de equilíbrio entre o ar e o grão, considerando somente a troca de calor sensível, faz-se necessário o seguinte balanço de energia (Equação 1):

$$\begin{aligned} 0,24 \cdot T_0 + W_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_0) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{g0} = \\ 0,24 \cdot T_e + W_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{ge} \end{aligned} \quad (1)$$

em que,

$T_0$  - temperatura do ar na entrada da camada de grãos, °C;

$W_0$  - razão de mistura do ar na entrada da camada de grãos, kg de vapor d'água por kg de ar seco;

$T_{g0}$  - temperatura do grão no instante t, °C;

$T_e$  - temperatura do ar em equilíbrio com o grão, °C;

$T_{ge}$  - temperatura do grão em equilíbrio com o ar, °C;

$U$  - teor de água do grão no tempo t, decimal b.s.;

$C_p$  - entalpia específica do milho, kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>;

$R$  - razão entre a massa de matéria seca da camada de grãos e a massa de ar seco que passa no intervalo de tempo  $\Delta t$ , kg kg<sup>-1</sup>.

Admitindo-se que a temperatura do grão é igual à temperatura do ar que a envolve, tem-se (Equação 2):

$$T_{ge} = T_e \quad (2)$$

A razão entre as massas de matéria seca e de ar seco foi determinada no início da simulação, por meio da Equação 3:

$$R = \frac{\rho \cdot v_e \cdot S \cdot \Delta x}{Q \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot (1 + U_0)} \quad (3)$$

em que,

$U_0$  - teor de água inicial, decimal b.s.;

$\Delta x$  - espessura da camada de grãos, m;

$\Delta t$  - incremento de tempo, h;

$\rho$  - massa específica do produto no início da secagem, kg m<sup>-3</sup>;

$Q$  - vazão de ar, m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>;

$S$  - área da seção transversal, m<sup>2</sup>;

$v_e$  - volume específico do ar,  $m^3 kg^{-1}$ .

A entalpia específica do milho é função de seu teor de água (Souza et al., 2002) e foi estimada por meio da Equação 4.

$$C_p = \left[ 0,35 + \frac{0,851 \cdot U}{1 + U} \right] \cdot 4,1868 \quad (4)$$

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto foi determinada, por Thompson et al. (1968), por meio da equação de balanço de calor (Equação 5).

$$T_e = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot RU) \cdot T_0 + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{g0}}{0,24 + 0,45 \cdot RU + C_p \cdot R \cdot (1 + U)} \quad (5)$$

em que,

RU - razão de umidade, adm.

Para calcular a umidade de equilíbrio do produto é necessário determinar primeiramente a umidade relativa do ar. Para isso, foi utilizada a equação apresentada por Brooker et al. (1992):

$$U_r = \frac{100 \cdot P_{atm} \cdot W_0}{(0,622 + W_0) \cdot P_{vs}} \quad (6)$$

em que,

$U_r$  - umidade relativa do ar, %;

$P_{atm}$  - pressão atmosférica, kPa;

$P_{vs}$  - pressão de vapor de saturação do ar, à temperatura  $T_e$ , kPa;

$W_0$  - razão de mistura do ar na entrada da camada de grãos, kg de vapor d'água por kg de ar seco.

A pressão de vapor de saturação do ar foi determinada pela Equação 7, apresentada em Queiroz e Pereira (2004), que segundo Keenan e Keyes (1936) pode ser usada para a faixa de temperatura absoluta entre 273,16 a 533,16 K.

$$\ln\left(\frac{P_{vs}}{R'}\right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \quad (7)$$

em que,



$$R' = 22105649,26; A = -27405,526; B = 97,5413; C = -0,146244;$$

$$D = 0,12558 \times 10^{-3}; E = -0,48502 \times 10^{-3}; F = 4,34903 \text{ e } G = 0,39381 \times 10^{-2}$$

O teor de água de equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa do ar que circunda os grãos. Para descrever o teor de água de equilíbrio dos grãos de milho, foi usada a Equação 8 (QUEIROZ e PEREIRA, 2004).

$$U_e = 0,01 \cdot \left[ \frac{\ln \left( 1 - \frac{U_r}{100} \right)}{(-8,6541 \times 10^{-5}) \cdot (T_e + 49,81)} \right]^{1/1,8634} \quad (8)$$

em que,

$U_e$  - teor de água de equilíbrio dos grãos de milho, decimal b.s.

O tempo equivalente é definido como o intervalo de tempo que o produto deveria ficar exposto às condições existentes, no tempo  $t$  ( $T_e, W_0$ ), para que o teor de água fosse reduzido do valor inicial ( $U_0$ ) para o valor atual ( $U$ ). Para se determinar o tempo equivalente na secagem do milho a granel usou-se a seguinte equação empírica (Equação 9):

$$t = J \cdot \ln(RU) + L \cdot [\ln(RU)]^2 \quad (9)$$

em que,

$t$  - tempo de secagem, h;

$J$  e  $L$  - parâmetros dependentes da temperatura do ar.

Os parâmetros  $J$  e  $L$ , obtidos a partir das curvas de secagem do milho em camada fina para diferentes temperaturas, foram calculados por meio das Equações 10 e 11.

$$J = -1,706 + 0,0088 \cdot T \quad (10)$$

$$L = -148,7 \cdot e^{(-0,059 \cdot T)} \quad (11)$$

em que,

$T$  - temperatura do ar de secagem, °C.

A razão de umidade do produto foi calculada para o tempo  $t$ , conforme a Equação 12:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} \quad (12)$$

A razão de umidade do produto, após secagem às condições de ar  $T_e$  e  $W_0$ , durante um intervalo  $\Delta t$ , de tempo, foi determinada pela equação de secagem em camada delgada (Equação 13):

$$RU_f = e^{\left( \frac{-A - \sqrt{A^2 + 4Bt}}{2B} \right)} \quad (13)$$

em que,

$RU_f$  - razão de umidade final do produto, adm.

O teor de água dos grãos de milho no tempo  $t + \Delta t$  foi determinada utilizando-se a Equação 14:

$$U_f = RU_f \cdot (U_0 - U_e) + U_e \quad (14)$$

em que,

$U_f$  - teor de água do produto na camada, no tempo  $t + \Delta t$ .

A razão de mistura do ar consistente com a perda de umidade do produto foi determinada por um balanço de massa (Equação 15):

$$W_f = W_0 + R \cdot (U - U_f) \quad (15)$$

em que,

$W_f$  - razão de mistura do ar na saída da camada de grãos, kg de vapor d'água por kg de ar seco.

As temperaturas finais do ar e do produto foram determinadas por meio de um balanço de energia que leva em conta a perda de umidade dos grãos (Equação 16):

$$0,24 \cdot T_e + W_0 \cdot (588 + 0,45 \cdot T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{ge} + (W_f - W_0) \cdot T_{ge} = 0,24 \cdot T_f + W_f \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{gf} + (W_f - W_0) \cdot \Delta L_v \quad (16)$$

em que,

$T_f$  - temperatura do ar saindo da camada de grãos, °C;

$T_{gf}$  - temperatura do produto na camada no tempo  $t + \Delta t$ , °C;

$\Delta L_v$  - entalpia latente de vaporização acima do valor para evaporação da água livre,  $\text{kJ kg}^{-1}$  de água.

A entalpia latente de vaporização da água nos grãos de milho depende da sua temperatura e teor de água, e foi estimada pela Equação 17, sendo obtida conforme proposto em Souza e Correa (1998) e Souza et al. (2006).

$$\Delta L_v = (606 - 0,57 \cdot T) \cdot [1,0287 \cdot e^{(-15,3796 \cdot U)}] \cdot 4,1868 \quad (17)$$

em que,

$\Delta L_v$  - entalpia latente de vaporização d'água do grão de milho,  $\text{kJ kg}^{-1}$ .

O primeiro e segundo termo de cada lado da Equação 16 representam as entalpias inicial e final do ar. O terceiro termo de cada lado da equação representa a energia contida no produto, nos tempos  $t$  e  $t + \Delta t$ . O quarto termo do lado esquerdo da igualdade representa a quantidade de energia contida na água que está sendo retirada do produto. O último termo da equação representa a quantidade de energia adicional necessária para evaporar a água do produto, acima da quantidade necessária para evaporar a água livre.

Admitindo-se que a temperatura do grão é igual à do ar que a envolve, tem-se:

$$T_{gf} = T_f \quad (18)$$

Explicitando  $T_f$ , na Equação 18 obtém-se a Equação 19:

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45 \cdot W_0) \cdot T_e - (W_f - W_0) \cdot (588 + \Delta L_v - T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_e}{0,24 + 0,45 \cdot W_f + C_p \cdot R \cdot (1 + U)} \quad (19)$$

Efetuada todos esses cálculos, é necessário verificar se o resultado obtido é factível. Em certos casos, podem-se obter resultados em que a umidade relativa do ar, determinada matematicamente, é superior a 100%. Se isso ocorrer, novos balanços de massa e de energia deverão ser feitos, simulando a condensação de água no produto.

Nesses novos balanços, o ponto de estado  $T_f$  e  $W_f$ , não factível, será corrigido para o ponto de estado  $T_f^*$  e  $W_f^*$ . Esses novos balanços são representados pelas equações 20 e 21:

$$\begin{aligned} 0,24 \cdot T_f + W_f \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f) + (W_f^* - W_f) \cdot T_f + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_f = \\ 0,24 \cdot T_f^* + W_f^* \cdot (588 + 0,45 \cdot T_f^*) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_f^* \end{aligned} \quad (20)$$

Na Equação 20, existem duas variáveis a serem determinadas,  $T_f^*$  e  $W_f^*$ . A outra condição usada para tornar possível a determinação do ponto de estado factível, é que a umidade relativa determinada matematicamente seja, no máximo, igual a 100%.

A quantidade de água condensada no produto faz com que o seu teor de água passe a ser  $U_f^*$ , conforme Equação 21:

$$U_f^* = U_f - \frac{W_f^* - W_f}{R} \quad (21)$$

### Procedimentos experimentais

As secagens foram realizadas em grãos de milho BRS 3150, em escala comercial, com temperatura do ar de 40 e 50 ± 2°C. A secagem em cada secador foi considerada como um teste e não como repetição, devido às diferenças nos teores de água iniciais na época da colheita.

O teor médio de água foi obtido a partir do valor médio das amostras coletadas nas posições 13 e 38 cm da massa de grãos, em relação à parede do duto interno. Foram utilizados, para a sua determinação, o método padrão em estufa à 105 ± 3°C, durante 24 h (BRASIL, 1992). As temperaturas do ar de secagem, de exaustão e da massa de grãos foram medidas utilizando-se um termômetro digital, com resolução de 1°C. A temperatura e umidade relativa ambiente foram monitoradas por meio de termohigrógrafo equipado com sensor eletrônico, com resolução de 1°C e 1%, respectivamente.

A amostragem de grãos nas câmaras de secagem foi realizada em intervalos regulares de tempo (a cada 20 minutos). A amostra inicial foi obtida durante o carregamento do secador. Durante a secagem, foram amostradas a porção nas posições 13 e 38 cm da massa de grãos, em relação à parede do duto interno.

No secador de grãos de milho, o ar foi distribuído por meio de um duto vertical perfurado, com diâmetro igual a 0,78 m, instalado no centro geométrico do silo, onde o ar era forçado a passar radialmente pela massa de grãos sob a ação de um obstruidor de fluxo. Um sistema de alavanca e roldanas permitia que o obstruidor fosse movimentado ou fixado na posição desejada, em qualquer altura da coluna de grãos, cuja espessura era igual a 0,63 m. Os secadores, adquiridos no mercado, foram construídos em madeira e metal, possuindo diâmetro externo de 2,04 m, como mostrado na Figura 2.

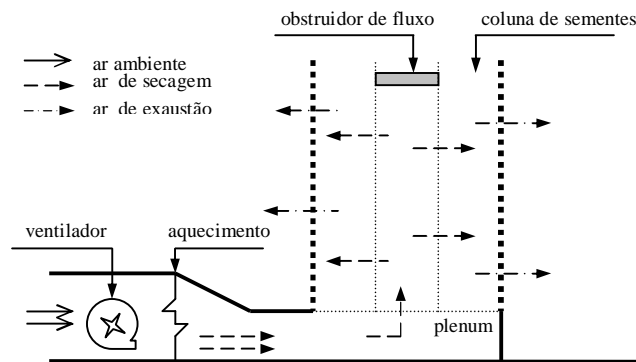


FIGURA 2 . Sistema de secagem em secador com distribuição radial de ar (SOUZA et al., 2002).

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros usados na secagem, bem como os dados de entrada do modelo matemático de simulação de secagem do programa computacional implementado.

TABELA 1. Parâmetros de secagem usados nos testes visando a validação do modelo matemático implementado

Parâmetro	Teste de secagem					
	1	2	3	4	5	6
Grãos						
Teor de água inicial (%bu)	14,9	16,0	17,5	16,7	16,5	16,4
Temperatura inicial dos grãos (°C)	28,0	30,0	28,3	28,1	28,0	28,0
Teor médio de água final (%bu)	11,0	12,0	12,1	10,9	11,7	12,2
Secador						
Vazão de ar (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	127,5	127,5	127,5	110,7	110,7	125,9
Altura da camada de grãos (m)	0,802	0,806	0,802	0,806	0,793	0,797
Ar						
Temperatura de secagem (°C)	50,1	49,9	50,0	50,0	40,0	40,0
Temperatura ambiente (°C)	27,6	28,7	26,8	27,0	26,3	28,0
Umidade relativa (%)	32,0	28,0	33,7	33,5	37,4	35,2

### Validação do modelo matemático

Na comparação entre as curvas de secagem em função do tempo, utilizou-se a combinação do teste t aplicado ao erro médio (Equação 22), da variância explicada ( $R^2$ ) e do erro relativo absoluto médio (Equação 26). Foram utilizados 5% de probabilidade nas comparações entre as curvas.

$$t_{\bar{e}} = \frac{\bar{e} - 0}{S_{\bar{e}}} \sim t_{\alpha(n-1)} \quad (22)$$

Sendo:

$$S_{\bar{e}} = \frac{S_e}{\sqrt{n}} \quad (23)$$

em que:

$\bar{e}$ , erro relativo médio;

$S_{\bar{e}}$ , desvio padrão do erro médio;

$S_e$ , desvio padrão;

$\alpha$ , significância do teste t;

$n$ , número de observações;

$t_{\bar{e}}$ , valor do teste t do erro médio.

O erro relativo médio entre os dados das curvas de secagem foi determinado utilizando-se a Equação 24, considerando-se que o erro (Equação 25) é uma variável que segue uma distribuição normal e ocorre ao acaso, pode-se testar a hipótese ( $H_0: \bar{e} = 0$ ) que o erro relativo médio é zero:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_e - Y_s}{Y_e} \right)}{n} \quad (24)$$

$$e = \frac{Y_e - Y_s}{Y_e} \quad (25)$$

em que,

$Y_e$  - valor observado experimentalmente;

$Y_s$  - valor calculado pelo modelo;

$e$  - erro relativo.

O erro absoluto relativo médio entre os dados experimentais e aqueles obtidos na simulação foi calculado conforme a seguinte equação:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_e - Y_s}{Y_e} \right) \quad (26)$$

em que,

P - erro relativo absoluto médio, %.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 é apresentada a tela de entrada de dados do programa de computador implementado, sendo denominado VertiSec – Simulação de Secagem de Milho em Leito Fixo Vertical. O usuário deve fornecer os dados relativos ao sistema a ser simulado, caracterizando os dados do produto, secador, condições iniciais do ar de secagem e características do local. Em seguida, aciona-se o botão *Simular* e os resultados são, então, exibidos no quadro *Resultados*.

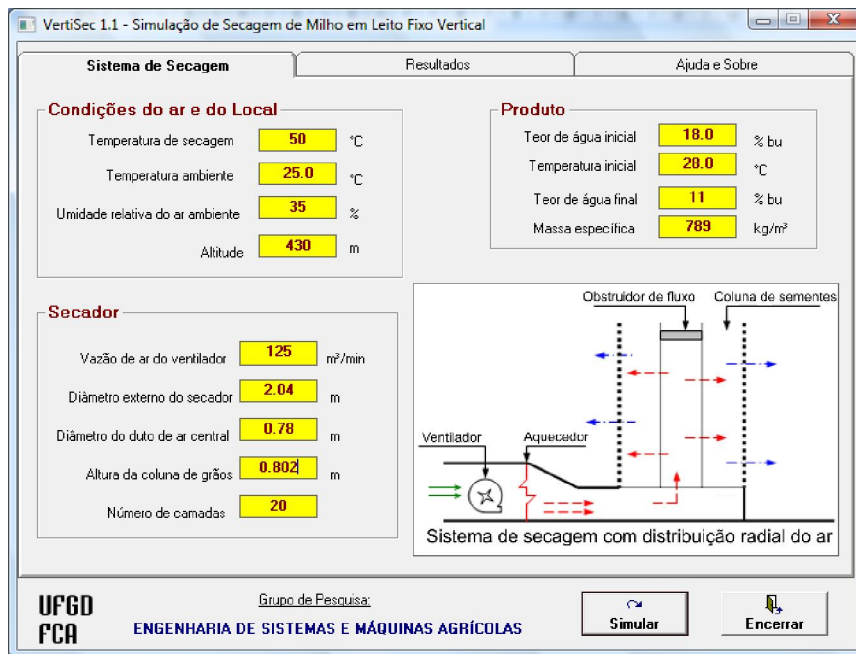


FIGURA 3. Tela de entrada de dados do programa computacional implementado para simular a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar de secagem.

Os resultados de cinética de secagem do milho fornecidos pelo programa computacional implementado são o tempo de secagem, o teor de água do produto, a temperatura do produto, e os dados em relação ao ar de saída (umidade relativa e temperatura) em função do tempo (Figura 4).

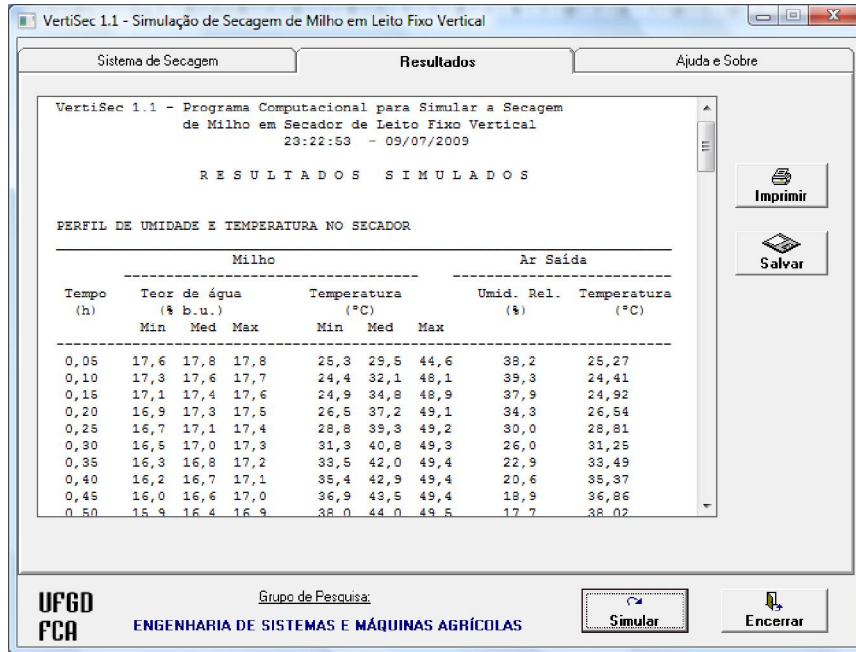


FIGURA 4. Tela de saída dos dados de cinética de secagem do programa computacional implementado para simular a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar de secagem.

Na Figura 5 está apresentada a tela de saída dos parâmetros calculados na simulação com o programa computacional implementado para simular a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar de secagem. Nessa opção são obtidos a massa inicial de produto no secador, a massa de água retirada durante a secagem, a energia consumida para o aquecimento do ar de secagem, o consumo específico de energia, o tempo total de secagem, o teor final de água e o fluxo de ar, além de serem apresentados os dados de entrada de dados.



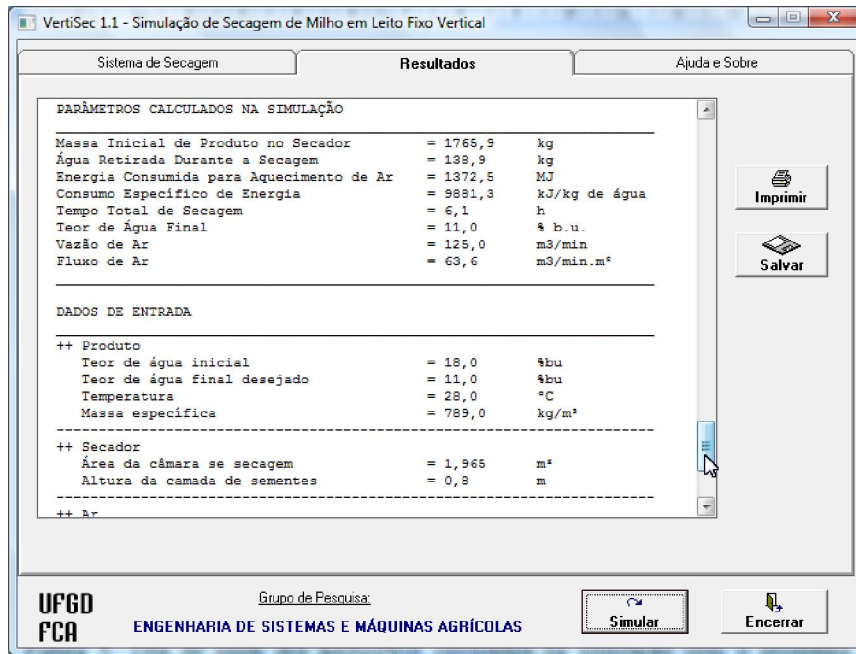


FIGURA 5. Tela de saída dos parâmetros calculados na simulação com o programa computacional implementado para simular a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar de secagem.

Na Figura 6 está apresentado o gráfico de correspondência entre os dados de tempo de secagem experimental e simulados usando o programa computacional implementado. Pode-se verificar que os dados simulados corresponderam em 92% os valores dos dados obtidos experimentalmente e apresentando erro relativo absoluto médio de 4,8%. O teste t do erro médio foi não significativo a 1% de probabilidade, mostrando que os erros ocorridos na simulação são aleatórios e iguais a zero.

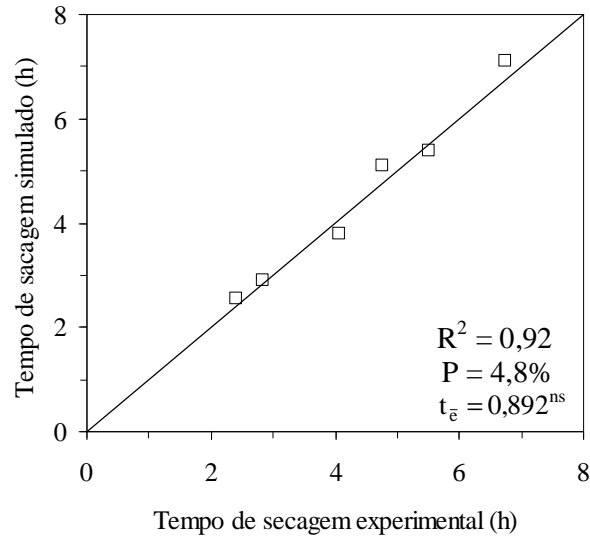
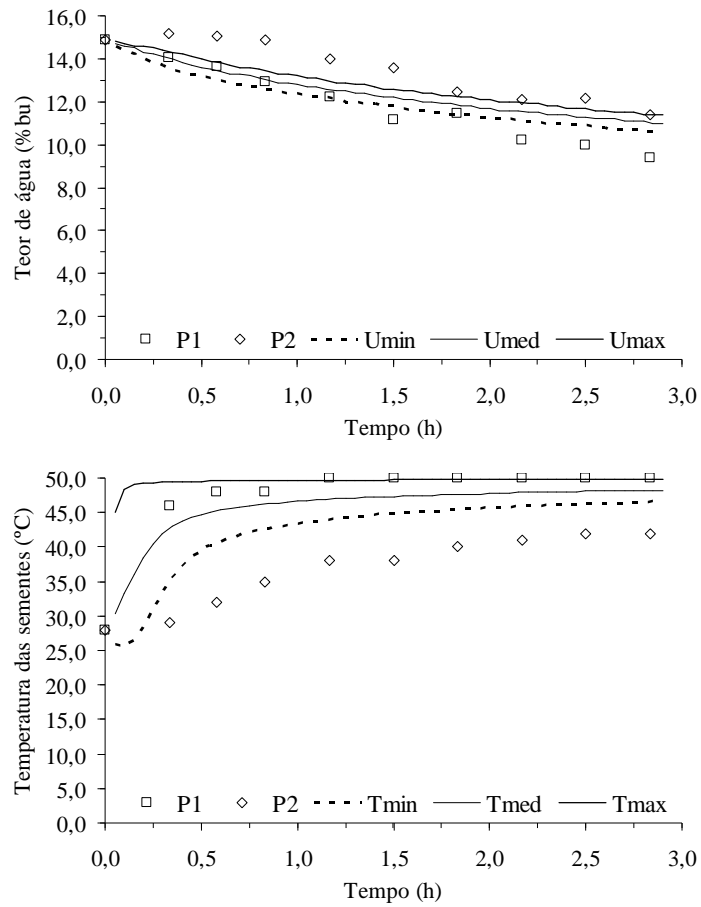


FIGURA 6. Gráfico de correspondência entre os dados de tempo de secagem experimental e simulados usando o programa computacional implementado.

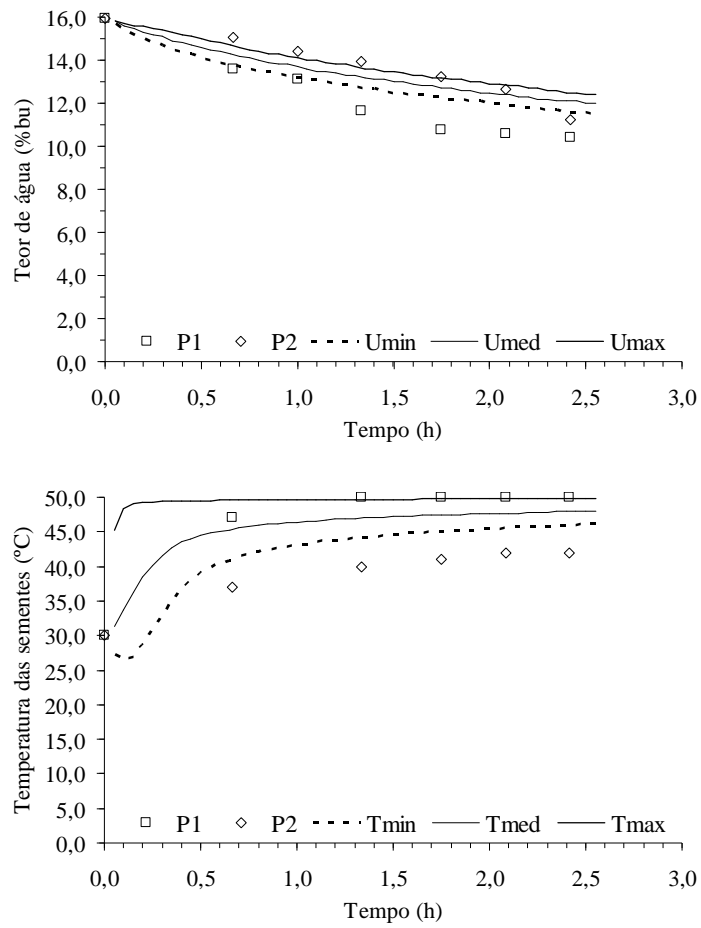
Dessa forma, o modelo de simulação implementado pode ser considerado satisfatório para simular o tempo de secagem de grãos de milho em secador com distribuição radial do ar, pois, além da não significância do teste t do erro médio, apresentou erro relativo absoluto médio inferior àqueles considerados satisfatórios por Mata e Dantas (1998) na secagem de cacau, Souza et al. (2002) na do milho e Rodrigues et al. (2007) na de abacaxi, que foram de 20,0; 10,8 e 7,3%.

Nas Figuras 7 a 12 estão apresentados os dados de teores de água e temperaturas dos grãos de milho, secadas em secador de leito fixo com distribuição radial do ar, em função do tempo de secagem. Pode-se observar que o comportamento do teor de água e da temperatura dos grãos foram semelhantes àqueles obtidos utilizando o modelo matemático implementado, independentemente do teste de secagem realizado.



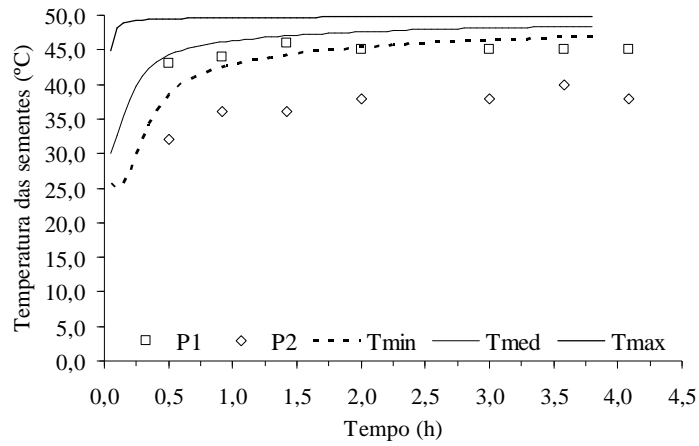
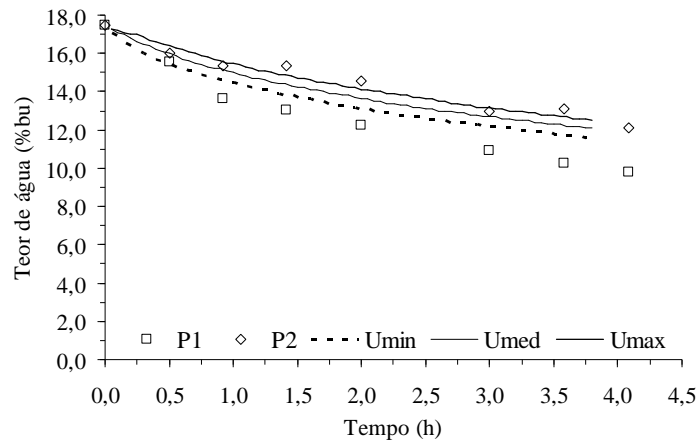
P1: ponto 1. P2: ponto 2. Umin: teor mínimo de água.  
Umed: teor médio de água. Umax: teor máximo de água.

FIGURA 7. Teores de água e temperatura dos grãos de milho em função do tempo, secadas no secador número 5, no teste 1.



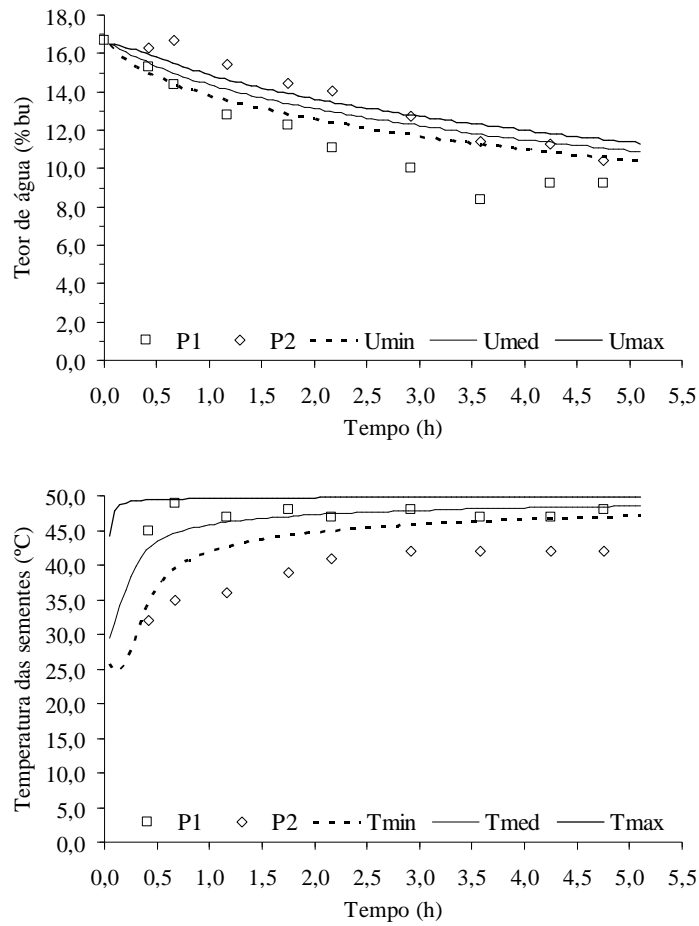
P1: ponto 1. P2: ponto 2. Umin: teor mínimo de água.  
Umed: teor médio de água. Umax: teor máximo de água.

FIGURA 8. Teores de água e temperatura dos grãos de milho em função do tempo, secadas no secador número 5, no teste 2.



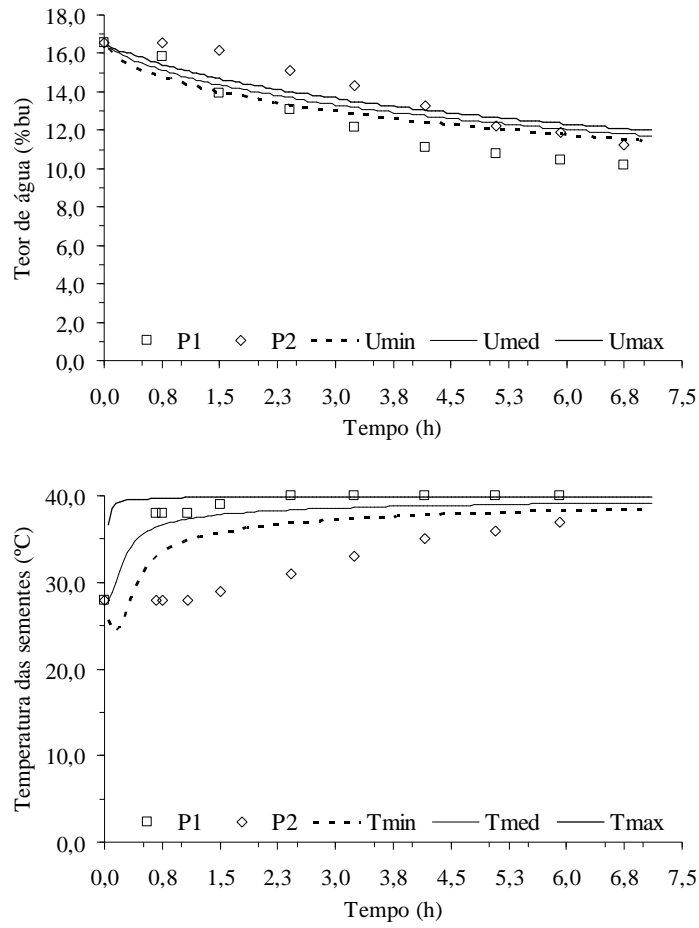
P1: ponto 1. P2: ponto 2. Umin: teor mínimo de água.  
Umed: teor médio de água. Umax: teor máximo de água.

Figura 9. Teores de água e temperatura dos grãos de milho em função do tempo, secadas no secador número 4, no teste 3.



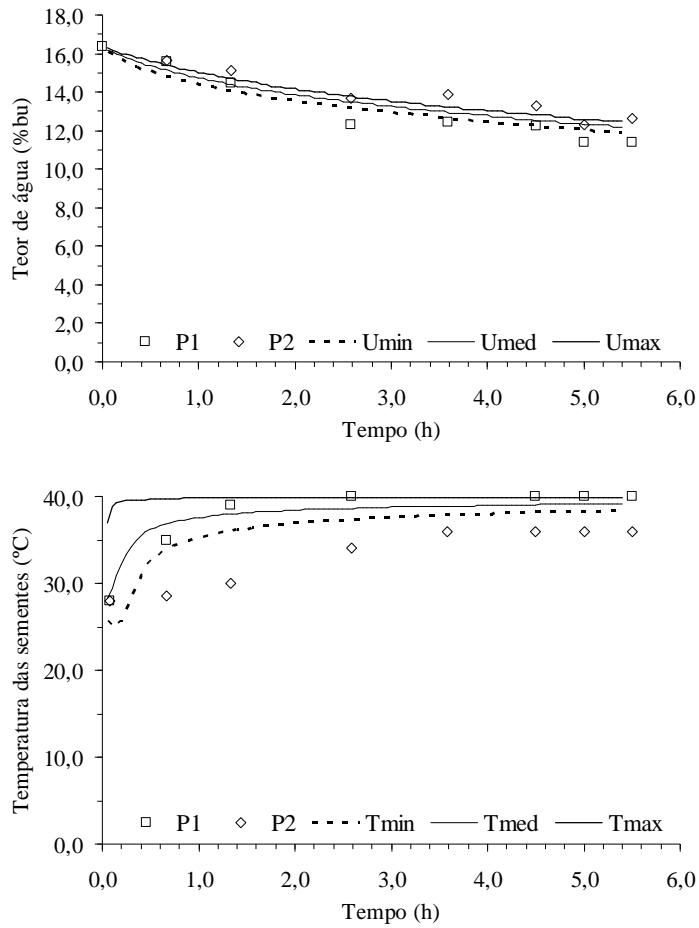
P1: ponto 1. P2: ponto 2. Umin: teor mínimo de água.  
Umed: teor médio de água. Umax: teor máximo de água.

Figura 10. Teores de água e temperatura dos grãos de milho em função do tempo, secadas no secador número 3, no teste 4.



P1: ponto 1. P2: ponto 2. Umin: teor mínimo de água.  
Umed: teor médio de água. Umax: teor máximo de água.

Figura 11. Teores de água e temperatura dos grãos de milho em função do tempo, secadas no secador número 3, no teste 5.



P1: ponto 1. P2: ponto 2. Umin: teor mínimo de água.  
Umed: teor médio de água. Umax: teor máximo de água.

Figura 12. Teores de água e temperatura dos grãos de milho em função do tempo, secadas no secador número 5, no teste 6.

## CONCLUSÕES

O modelo matemático implementado para a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar, mostrou-se viável, pois apresentou precisão satisfatória e é válido para simular a secagem de milho.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARIYAVIRIYA, S.; PUTTAKARN, B. A Mathematical Model of Effective Moisture Diffusivity for Lychee Drying. IN: International Conference on Crop Harvesting and Processing, 9-11 February, 2003 (Louisville, Kentucky USA) **Proceedings...** ASAE Publication Number 701P1103e, 2003.
- ALVES, W.M.; FARONI, L.R.; QUEIROZ, D.M.; CORRÊA, P.C.; GALVÃO, J.C.C. Qualidade dos grãos de milho em função da umidade de colheita e da temperatura de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, p.469-474, 2001.
- ANDRADE, E.T.; CORRÊA, P.C.; TEIXEIRA, L.P.; PEREIRA, R.G.; CALOMENI, J.F. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, v.8, p.83-95, 2006.
- ARAÚJO, E.F.; CORRÊA, P.C.; SILVA, R.F. Comparação de modelos matemáticos para a descrição das curvas de dessecamento de sementes de milho-doce. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.7, p.991-995, 2001.
- BABALIS, S.J.; VELESSIOTIS, V.G. Influence conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying on figs. **Journal of Food Engineering**, 65:449-458, 2004.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 1992. 365p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.M. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992. 450p.
- CONAB. (2009). Acompanhamento da Safra 2008/2009: nono levantamento. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 15/06/2009.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris*L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 501-510, 2007.
- FIGLIORINI, R.; MORINI, B. Yan (*Discorea sp.*) drying with different cuts and temperatures: experimental and simulated results. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. vol. 20, n.2, mai/ago. 2000.
- HAWLADER, M.N.A.; UDIN, M.S.; HO, J.C.; TENG, A.B.W. Drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**. 14:259-268, 1991.
- MANCINI, M.C.; CALÇADA, L.A.; MASSARANI, G.; BISCAIA JÚNIOR, E.C. Secagem de feijão em leito fixo. **Revista Universidade Rural**, Série Ciências Exatas e da Terra, v.21, n.1, p.89-96, 2002.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: Fealq, 2005. 495 p.

MATA, M.E.R.M.C.; DANTAS, L.A. Modelo de simulação de secagem de cacau (*Theobroma cacao* L.) em camada fixa. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.23, p.52-60, 1998.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral. **Atlas Multirreferencial**. Campo Grande, 1990. 28p.

MOURA, R.S.F.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; SOUSA, A.G.; SILVA, M.M.; OLIVEIRA, A.M.V. Modelagem matemática para isotermas em polpa de caju. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n.2, p.1-11, 2004.

PÉREZ-ALEGRÍA, L.R.; CIRO-VELÁSQUEZ, H.J. Mathematical simulation of parchment coffee drying in a deep bed with airflow reversal. **Transactions of the ASAE**, v.44, n.5, p.1229-1234, 2001.

QUEIROZ, D.M.; CORRÊA, P.C.; SOUZA, C.M.A. SIMSEC – Um programa para simulação de secagem. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-COLHEITA, 1, Porto Alegre, 1999. **Anais**. Passo Fundo: Abrapós; Cesa; Embrapa Trigo, 1999. p.248.

QUEIROZ, D.M.; CORREA, P.C.; SOUZA, C.M.A.; AFONSO JÚNIOR, P.C. Intermittent coffee drying simulation models. In: **ASAE Annual International Meeting**, 2001, Sacramento, USA., Paper n. 01-6027. St. Joseph, Michigan, EUA: The American Society of Agricultural Engineers, 2001., 2001. p. 1-10.

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M. Higroscopia. Viçosa: CENTREINAR/UFV, 2004. 22p.

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M. **Psicrometria**. Viçosa: CENTREINAR/UFV, 2004. 25p.

RODRIGUES, E.; SILVA, J.N.; SOUZA, C.M.A.; LACERDA FILHO, A.F. ; CHAVES, M.A. . Simulação da secagem de abacaxi em fatias em secador de leito fixo. **Engenharia na Agricultura**, v. 16, p. 381-393, 2008.

ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenagem de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: ACIESP, 1980. 295p.

SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, Aprenda Fácil. 2000. 502p.

SOUZA, C.M.A.; CORREA, P.C. Programa Computacional para Determinação da Entalpia de Vaporização da Água de Produtos Agrícolas. In: **27º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 1998, Poços de Caldas, 1998. v.4. p.49-51.

SOUZA, C.M.A.; QUEIROZ, D.M. ; LACERDA FILHO, A.F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 653-660, 2002.

SOUZA, C.M.A. ; RODRIGUES, E. ; RAFULL, L.Z.L. ; SILVA, J.N. Programa computacional para simular a secagem de abacaxi em secador de leito fixo. In: **IX Congreso Argentino de Ingeniería Rural y I del MERCOSUR**, 2007, Córdoba. La ingeniería rural y el cambio climático, 2007. v. 1. p. 1-10.

SOUZA, C.M.A.; TERTULIANO, P.C.; RAFULL, L.Z.L.; PRAT, M.I.H.; ROBAINA, A.D. Comparación de modelos matemáticos para descripción de las curvas de entalpia de vaporización de agua de diferentes productos agrícolas. In: **Conferencia Científica de Ingeniería Agrícola de La Habana**, 2006, Habana. 2ª Conferencia Científica de Ingeniería Agrícola de La Habana, 2006. v. 1. p. 1-14.

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

TOLEDO, F.F.; MARCOS FILHO, J. **Manual de sementes**: tecnologia de produção. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1977. 224p.

TOGRUL, I.T.; PEHLIVAN, D. Modelling on thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **Journal of Food Engineering**. 65:413-425. 2004.

## CONCLUSÃO GERAL

Foi realizada a modelagem e a simulação da secagem de milho em secador de leito fixo com distribuição radial do ar, na região da Grande Dourados-MS.

Todos os modelos testados no presente trabalho foram satisfatórios para representar o processo de secagem dos grãos de milho, tendo sido o modelo de Page selecionado para descrever a cinética de secagem de grãos de milho em camada delgada. Em geral, os valores das constantes  $k$  e  $n$  aumentaram à medida em que se eleva a temperatura do ar de secagem.

A relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem pode ser descrita pela Equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de grãos de milho de  $31,54 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Foi desenvolvido um programa computacional denominado VertiSec<sup>®</sup>, utilizando a linguagem de programação MS Visual Basic, e o modelo matemático implementado para a secagem de milho em secador com distribuição radial do ar, que mostrou-se viável, pois apresentou precisão satisfatória e é válido para simular a secagem de milho.