

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

**CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA:
INFLUÊNCIA VARIETAL**

RENATA HENRIQUE HOSCHER

SINOP
MATO GROSSO – BRASIL
2016

RENATA HENRIQUE HOSCHER

**CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA: INFLUÊNCIA
VARIETAL**

Orientador: **Prof. Dr. Fernando Mendes Botelho**

Co-orientadora: **Dra. Sílvia de Carvalho Campos Botelho**

Trabalho de Curso apresentado à
Universidade Federal de Mato Grosso -
UFMT - *Campus* Universitário de Sinop,
como parte das exigências para obtenção
do Título de Engenheira Agrícola.

SINOP

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

H519c Henrique Hoscher, Renata.
CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA:
INFLUÊNCIA VARIETAL / Renata Henrique Hoscher. --
2016
38 f. ; 30 cm.

Orientador: Fernando Mendes Botelho.
Co-orientadora: Sílvia de Carvalho Campos Botelho.
TCC (graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) -
Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências
Agrárias e Ambientais, Sinop, 2016.

1. Glycine max L. Merrill. 2. teor de água. 3. modelos
matemáticos. I. Título.

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

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL
COMISSÃO DE TRABALHO DE CURSO



TERMO DE APROVAÇÃO DE TC

TÍTULO DO TRABALHO: **Cinética de secagem de grãos de soja: Influência varietal**

ACADÊMICA: **Renata Henrique Hoscher**

ORIENTADOR: **Fernando Mendes Botelho**

CO-ORIENTADORA: **Sílvia de Carvalho Campos Botelho**

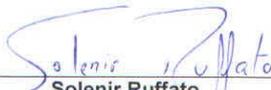
APROVADO PELA COMISSÃO EXAMINADORA:



Fernando Mendes Botelho
Orientador



Sílvia de Carvalho Campos Botelho
Co-orientadora



Solenir Ruffato
Membro

DATA DA DEFESA: 01 de Julho de 2016.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, por renovar a cada momento a minha disposição e pelo discernimento concedido ao longo dessa jornada.

À minha família, em particular, a minha mãe Evanir, heroína que me deu apoio, que sempre primou pela minha educação, e que nunca mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao professor Fernando, pela sua orientação, amizade, incentivo, pelas opiniões e críticas, total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho.

À Dra. Sílvia, pela co-orientação e juntamente com a professora Solenir, que contribuíram com sugestões e pela participação na banca.

À Universidade Federal do Mato Grosso – Campus Sinop, pela oportunidade de realização do curso.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica.

Ao Leonardo Meyer pela amizade, incentivo constante, apoio e compreensão nos momentos de angustias e ansiedades, pelo carinho e amor inenarrável, o meu muito obrigada.

Às minhas amigas e companheiras de faculdade, Raquel e Michele, pela participação direta neste trabalho, amizade, força e apoio.

Aos meus amigos Ana Claudia, Kássila, Mário Garutti e Hagatta, pelo afeto inestimável, incentivo, companheirismo, força e apoio em momentos difíceis.

A minha prima Guérique, pela atenção e contribuição neste trabalho.

A todos que colaboraram para a conclusão de mais uma etapa na minha vida e, embora não citados, não deixaram de merecer o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
MATERIAL E MÉTODOS	11
RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
ANEXOS	30

RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados coletados experimentalmente na secagem de grãos de quatro variedades de soja, selecionando aquele que melhor descreve as curvas de secagem. Além disso, buscou-se determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para a secagem de grãos de soja das variedades analisadas. Foram utilizados grãos de soja de variedades precoces (NS7901RR e TMG1180RR) e de ciclo médio (TMG132RR e P98Y70). Os grãos foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Verificou-se que, de todos os modelos ajustados, o modelo de Midilli para a variedade NS7901RR e os modelos Dois termos, Midilli e Page para a variedade TMG1180RR foram os que melhor descreveram as curvas de secagem para essas variedades. Para as variedades TMG132RR e P98Y70, os modelos Aproximação da difusão, Dois termos e Midilli foram os recomendados para descrever as curvas de secagem, por apresentarem ajuste satisfatório para todas as condições de secagem testadas. Os valores dos coeficientes de difusão efetivos de todas as variedades aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo que a maior diferença para este coeficiente foi notada quando as variedades foram comparadas segundo o seu ciclo reprodutivo (precoce e médio). Essa observação também foi pertinente para a energia de ativação, entretanto, as maiores magnitudes, de modo geral, foram observadas na secagem das variedades precoces.

PALAVRAS-CHAVE: *Glycine max* L. Merrill, teor de água, modelos matemáticos

ABSTRACT

This work aimed to adjust different mathematical models to experimental data collected in grains drying of four distinct soybeans varieties, selecting the one that best describes the drying curves. Besides that, it sought to determine the effective diffusion coefficient and the activation energy for drying of soybeans varieties analyzed. Were used early cycle soybeans varieties (NS7901RR and TMG1180RR) and medium cycle (TMG132RR and P98Y70). The grains were dried in a forced air circulation oven, at temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C. It was verified that, of all adjusted models, the Midilli model for NS7901RR variety, and the Two Terms, Midilli and Page models for TMG1180RR variety, were those that better described the drying curves for these varieties. For TMG132RR and P98Y70 varieties, diffusion Approximation, Two Terms and Midilli models were recommended to describe the drying curves, to present a satisfactory adjustment for all tested drying conditions. The values of effective diffusion coefficients of all varieties increased with the elevation of drying air temperature, being the biggest difference for this coefficient was observed when varieties were compared according to their reproductive cycle (early and medium). This observation was also relevant to the activation energy, however, the greatest magnitude, generally, were observed in drying of early cycle varieties.

KEYWORDS: *Glycine max* L. Merrill, Moisture Content, Mathematical Models

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma das mais importantes culturas produzidas no mundo. Este produto é muito usado na agroindústria na produção de óleo vegetal e rações para alimentação animal, na indústria química e na indústria de alimentos. Recentemente, vem expandindo também o uso como fonte alternativa de biocombustível (COSTA NETO, 2000). A soja foi a cultura agrícola que mais cresceu no Brasil nas últimas três décadas e correspondeu a 58,13% da área plantada em grãos no país na safra de 2014/2015. O aumento da sua produtividade está associado aos avanços tecnológicos, ao manejo e eficiência dos produtores. Representa um dos produtos mais destacados da agricultura nacional e grande responsável pelo equilíbrio da balança comercial (CONAB, 2015; EMBRAPA SOJA, 2016).

No Brasil, a safra de soja 2014/2015 atingiu 96,2 milhões de toneladas, representando um incremento de 10,52% em relação à safra anterior. Este crescimento deve-se às condições climáticas favoráveis para essa safra e ao aumento na área plantada. Atualmente o Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás apenas dos EUA. Na safra 2015/2016, a cultura ocupa uma área de 33,1 milhões de hectares, o que totalizou em uma produção de 96,9 milhões de toneladas, representando um incremento de 0,7% em relação à safra anterior. A produtividade média da soja brasileira foi de 2.929 kg por hectare. Dos estados brasileiros, o Mato Grosso é líder em produção, totalizando 27,02 milhões de toneladas na safra de 2015/2016, seguido pelo Paraná cuja produção chegou a 17,11 milhões de toneladas (CONAB, 2016).

No estado de Mato Grosso, geralmente se praticam duas safras anuais, sendo que normalmente a soja é plantada na primeira safra. Consequência disso, a soja é colhida num período de altos índices pluviométricos, exigindo que o produto seja pré-processado rapidamente. Dentre as etapas de pré-processamento de produtos agrícolas, destacam-se a limpeza e a secagem, tendo esta última a finalidade de retirar parte da água contida nos mesmos. Por definição, a secagem convectiva (usualmente praticada para secagem de grãos) é um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. Segundo Nowak e Lewicki (2004), a resistência à transferência de calor e massa nos materiais que estão sendo secos é grande e fortemente afetada pela cinética de evaporação da água.

A secagem permite também o planejamento por parte do produtor, possibilitando antecipar a colheita e conseqüentemente disponibilizar a área para novos cultivos, minimizar a perda do produto no campo, viabilizar o armazenamento seguro por um maior período de tempo, manter o poder germinativo por longo período e, impedir o desenvolvimento de microrganismos (SILVA, 2008).

Com a redução da disponibilidade de água nos grãos, consegue-se diminuir o desenvolvimento de microrganismos (principalmente fungos) o que evita o surgimento de grãos ardidos e micotoxinas, reduz-se o processo de respiração dos grãos, o que provoca perda de peso e gera calor na massa de grãos, e, desacelera a taxa de reações bioquímicas que promovem a autodegeneração do produto. Para o armazenamento de grãos de soja, dentro das condições brasileiras, é recomendado um teor de água próximo a 13%, pois a atividade de água (a_w) é estabilizada em níveis que inviabilizam o desenvolvimento de fungos e bactérias (SILVA, 2005).

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (GONELI et al., 2007).

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Fundamentalmente, tem-se três tipos de modelos: os modelos teóricos, os empíricos e os semiteóricos. Os modelos teóricos são baseados em leis e teorias físicas, geralmente envolvem muitas funções e parâmetros, tornando-os complexos, o que, para as práticas computacionais na maioria das situações não se torna conveniente (MASKAN, 2002).

Segundo Brooker et al. (1992), nos modelos teóricos normalmente se consideram os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos, como também as condições externas sob as quais a operação ocorre. O movimento da água no seu interior pode assumir mecanismos diferentes de acordo com o material que está secando. Para a maioria dos produtos agrícolas, como o caso de produtos capilares porosos, os possíveis mecanismos de transporte de água, são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica.

Os modelos empíricos são mais simples e de fácil aplicação, apesar de não terem fundamentação teórica. Estes baseiam-se em observações experimentais, na análise dimensional e na análise estatística. Existem ainda alguns modelos chamados de semiteóricos, que são simplificações e, ou ajustes dos modelos teóricos, principalmente advindos da teoria da difusão líquida com base na lei de Fick e na teoria de resfriamento de Newton (GONELI, 2008).

Na predição do processo de secagem, mesmo este sendo dependente das condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos, várias teorias têm sido propostas, porém, na maioria das vezes as relações semi-empíricas e empíricas se mostraram como melhores opções para esta predição (BROOKER et al., 1992).

Dentre os diferentes índices usados para avaliar a cinética de secagem dos produtos agrícolas, o coeficiente de difusão é um dos mais importantes. Esse índice possibilita avaliar

e comparar a velocidade de secagem de produtos com tamanhos, formas e texturas diferentes. Além disso, por meio de análise da dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, pode-se determinar alguns índices termodinâmicos que possibilitam avaliar energeticamente o processo de secagem (BOTELHO et al., 2015).

Para o cálculo teórico do coeficiente de difusão, muitos pesquisadores têm se baseado na teoria de difusão líquida, conhecida como a segunda lei de Fick, que estabelece uma relação do coeficiente de difusão com o gradiente de concentração de um meio (RESENDE et al., 2011; MARTINS et al., 2015; RODOVALHO et al., 2015; CORRÊA FILHO et al., 2015)

Para Botelho (2012) o quantitativo energético envolvido no processo de secagem é um fator importante de ser analisado, sendo possível de ser avaliado por parâmetros termodinâmicos. Esses índices são importantes para o desenvolvimento de equipamentos utilizados na secagem, quantificar a energia requerida neste processo, estudar as propriedades da água desorvida, avaliar a microestrutura dos alimentos e os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos.

Diante do apresentado, objetivou-se com o presente trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados coletados experimentalmente na secagem da soja, selecionando aquele que melhor descreve as curvas de secagem. Além disso buscou-se determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação para a secagem de grãos de soja das variedades analisadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma planta originária da china, pertence à família Fabaceae, é a principal fonte de óleo vegetal do mundo (STRECK et al., 2008). Devido à importância econômica dessa cultura para o Brasil e à grande velocidade com que novas cultivares de soja são lançadas anualmente, estudos básicos que auxiliam extensionistas e consultores a entender melhor aspectos relacionados ao crescimento e ao desenvolvimento dessas novas cultivares devem ser realizados de forma constante (VERNETTI; VERNETTI JUNIOR, 2009). A soja é uma planta de grande importância econômica, apresentando inúmeras utilizações, como adubação verde, alimentação humana, nutrição animal e usos industriais (MAGALHÃES, 2002).

O cultivo comercial da soja no Brasil iniciou-se nas décadas de 70 e 80, por contribuição do desenvolvimento de programas de melhoramento genético da cultura. Na atualidade, estas técnicas proporcionam aprimorar todas as características de interesse agrônomo (CAVALCANTE et al., 2010).

A produção de soja no mundo foi de 317,253 milhões de toneladas, na safra 2014/2015, com uma área plantada de 118,135 milhões de hectares. Em 2015 o maior produtor desse grão foi os EUA, com uma produção de 108,014 milhões de toneladas e com uma área plantada de 33,614 milhões de hectares (USDA, 2016).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, em 2014/2015 atingiu uma produção e área plantada de 96,243 milhões de toneladas e 32,092 milhões de hectares, respectivamente (CONAB, 2015).

O Mato Grosso é o estado que lidera a produção brasileira de soja, na atual temporada, possui uma produção de 27,017 milhões de toneladas, com uma área plantada de 9,14 milhões de hectares, tendo uma produtividade em torno 2,956 kg por hectare. Em seguida se encontra o estado do Paraná com uma produção de 17,109 milhões de toneladas, e 5,445 milhões de hectares de área plantada, e produtividade de 3,142 kg por hectare (CONAB, 2016).

O Departamento de Agricultura dos EUA (USDA) afirma que o Brasil continuará sendo o maior exportador de soja do mundo na safra de 2015/2016 elevando, inclusive, as exportações brasileiras de 58,0 para 59,5 milhões de toneladas. Porém o USDA ainda não apurou as perdas da produtividade brasileira que devem reduzir a produção estimada para o Brasil e assim as exportações brasileiras devem diminuir. A China é o principal destino para a soja produzida no Brasil, seguida, da União Europeia (CONAB, 2016).

Para Sedyama (2009) a maioria das cultivares de soja adaptadas para as condições brasileiras apresentam ciclo de 90 a 150 dias, sendo as cultivares mais utilizadas, aquelas com ciclo de 122 a 137 dias. Entretanto, os ciclos dessas cultivares podem variar de 75 a

200 dias, contados a partir da emergência até a maturação. As cultivares podem ser classificadas segundo o ciclo, como: precoces (até 115 dias), semiprecoce (116 a 125 dias), médios (126 a 140) e tardios (> 140 dias). Contudo, esses grupos de maturação não concordam em número de dias entre as cultivares e as distintas regiões de adaptação. Sendo assim, uma mesma cultivar pode apresentar diferentes ciclos, conforme as condições de manejo e as condições edafoclimáticas entre regiões distintas, principalmente quanto à latitude e à altitude (EMBRAPA, 2011).

Independentemente do ciclo, a soja normalmente é colhida com elevados teores de água e impurezas devendo ser submetida a diferentes etapas de pré-processamento visando manter os aspectos qualitativos do produto no momento da colheita. Dentre estas etapas, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos produtos agrícolas após sua colheita. Segundo Goneli (2008) a secagem possui a finalidade de reduzir a atividade de água do grão, por meio da redução do teor de água até níveis seguros que permitam o armazenamento por determinados períodos de tempo. A estabilidade é possibilitada pela secagem devido ao fato que a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem nos produtos agrícolas estão diretamente relacionadas com o seu teor de água. Desta forma, no caso, principalmente de grãos e sementes que apresentem alto teor de água, a secagem torna-se uma etapa fundamental para a conservação das qualidades desejáveis.

Na pós-colheita de produtos medicinais, a secagem aparece como uma operação unitária indispensável para a cadeia produtiva, visto que indústrias farmacêuticas de fitoterápicos não possuem estrutura para usar plantas frescas nas quantidades exigidas para a produção industrial e necessitam que as mesmas fiquem armazenadas por um período de tempo (LORENZI; MATOS, 2008).

No caso da secagem de produtos como frutas e hortaliças, o procedimento pode acarretar perdas de determinadas propriedades nutritivas. Entretanto, com a desidratação desses produtos observa-se algumas vantagens, como o aumento da sua vida útil; o alimento desidratado além de nutritivo (apesar das possíveis perdas de alguns nutrientes) tem seu valor alimentício concentrado por causa da perda de água; facilidade no transporte e comercialização, visto o alimento permanece estabilizado por longos períodos; redução na perdas pós-colheitas, além de agregar valor econômico (CELESTINO, 2010).

A redução do teor de água é um dos fatores que influenciam na variação das propriedades físicas dos materiais vegetais durante a secagem (RESENDE et al., 2005). Admitindo a particularidade de que cada produto, não só em relação às suas características físicas mas também por sua composição química, torna seu comportamento único durante o processo de dessecamento; logo, informações a respeito desta singularidade são de suma importância para auxiliar no processamento pós-colheita além de fornecer um conjunto de

dados aos engenheiros e projetistas, que servirão de base na elaboração de máquinas, estruturas, processos de controle e proporcionar melhor eficiência de um equipamento ou operação (ARAÚJO et al., 2014).

O volume é uma das características físicas que normalmente mais sofre variações durante a secagem trazendo como consequência a redução no seu tamanho ou até mesmo na sua forma geométrica (ARAÚJO et al., 2014). De acordo com Mayor e Sereno (2004), a redução do teor de água do produto pode causar danos em suas estruturas celulares tanto quanto variações na forma e redução em suas dimensões.

Durante a secagem, os grãos podem sofrer também perdas qualitativas importantes, causadas por excesso de aquecimento, velocidade do ar, umidade inicial e final, dependendo do sistema de secagem utilizado (BROOKER et al., 1992; OLIVEIRA, 2008). Por isso é de fundamental importância a adequação das condições de secagem à qualidade final do produto secado.

Para operações de secagem e armazenagem de grãos e sementes, torna-se necessário o conhecimento das relações entre a temperatura e a umidade relativa do ar e as condições desejáveis de conservação do produto. O fluxo de água nesses produtos durante a secagem depende de muitos fatores como a forma e a constituição química e se torna mais difícil à medida que o grão tende a atingir o teor de água de equilíbrio (GONELI, 2008).

É fundamental a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água, pois com estes dados desenvolve-se ou aperfeiçoa-se equipamentos utilizados na secagem de grãos. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que represente satisfatoriamente a perda de água do produto durante o processo de secagem (BERBERT et al., 1995).

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas. Estes modelos são utilizados para estimar o tempo de secagem de diferentes produtos e para a obtenção das curvas de secagem. Os parâmetros de secagem dos modelos são obtidos correlacionando-se a variação do teor de água do produto, após submetido à uma dada vazão e condição psicrométrica do ar, em função tempo (GONELI, 2008).

Na literatura são citados vários modelos para se analisar a secagem de produtos higroscópicos, sendo eles de base teórica, empírica ou semiempírica. Segundo Brooker et al., (1992), nos modelos teóricos normalmente se consideram as condições externas sob as quais o processo ocorre, como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos.

O método empírico é um método de abordagem com base em dados experimentais e na análise dimensional. Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta

entre o teor de água e o tempo de secagem; omitem os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros normalmente não têm significado físico; conseqüentemente, não oferecem uma visão apurada dos processos importantes que ocorrem durante o fenômeno, embora descrevam as curvas de secagem para as condições experimentais nas quais foram obtidos (KEEY, 1972).

Muita ênfase se tem dado ao desenvolvimento de modelos semiteóricos, que concorrem para que haja harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. Tais modelos se baseiam, de modo geral, na Lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa. Quando se aplica esta Lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas à superfície do produto (Brooker et al., 1992). Como exemplo de modelos semiteóricos que tem sido amplamente utilizado, tem-se: Dois Termos, Henderson e Pabis, Page, Page Modificado, entre outros (PANCHARIYA et al., 2002).

Pesquisas relacionadas ao estudo da cinética de secagem em camada delgada, são realizadas com diversos produtos agrícolas, como sementes, grãos, frutos e em algumas espécies de plantas, com importância econômica. Observa-se, conforme o produto e as condições do processo de secagem, que diferentes modelos se ajustam a cada situação específica (MARTINAZZO et al., 2007).

Segundo Botelho (2012) é necessário que exista uma força motriz, ou seja, um gradiente de concentração de água entre a superfície e o interior do produto, para então ocorrer a difusão de água em grãos.

A determinação do coeficiente de difusão durante a secagem de diversos produtos agrícolas têm se baseado na teoria da difusão líquida, conhecida como segunda lei de Fick, que estabelece uma relação do coeficiente de difusão com o gradiente de concentração de um meio. O coeficiente de difusão pode ser usado quando o produto é considerado um material homogêneo (IGUAZ et al., 2003). Apesar da teoria da difusão líquida ser amplamente empregada nos estudos de secagem, existem algumas suposições a serem consideradas para sua aplicação, como: a variação do volume deve ser desprezada, a não existência do efeito de capilaridade, o equilíbrio térmico instantâneo com o ar e os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro também são desconsiderados (MARTINAZZO et al., 2007).

Alguns autores realizaram trabalhos para a determinação do coeficiente de difusão. Resende et al. (2011) verificaram que durante a secagem de sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.), nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, o coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura, apresentando magnitudes entre $3,93 \times 10^{-10}$ e $9,19 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para o intervalo de temperatura de 30 a 70 °C. Corrêa Filho et al. (2015), determinaram os valores de difusão líquida para o figo (*Ficus carica* L.), cujo produto

foi submetido a secagem nas temperaturas de 40, 55 e 70 °C, e também concluíram que o coeficiente de difusão aumentou com a elevação da temperatura apresentando valores entre $1,76 \times 10^{-11}$ e $8,78 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para o intervalo de temperatura de 40 a 70 °C.

A composição química e a estrutura física dos produtos interferem na complexidade do mecanismo da difusão (SIQUEIRA et al., 2012). Desta maneira os dados disponíveis na literatura sofrem variação nos seus valores, visto que são obtidos por diferentes métodos de estimação, como o tipo de material, teor de água inicial e final, processo de secagem e metodologia utilizada para a sua obtenção (ZOGZAS et al., 1996). Além disso, fatores como temperatura elevada do ar de secagem, ação de tensões internas, características genotípicas do produto e danificação física devido ao seu processamento podem influenciar o processo difusivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório de Pós-colheita da Universidade Federal de Mato Grosso – *Campus Sinop*, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

Para a realização do experimento foram utilizados grãos de soja de variedades precoces, sendo NS7901RR com ciclo de produção de acordo com as empresas produtoras de sementes de 110 a 132 dias, e TMG1180RR com ciclo de 110 a 115 dias, a variedade semiprecoce, TMG132RR com ciclo de 118 a 122 dias e a variedade de ciclo médio, P98Y70 com ciclo de 135 a 140 dias, cultivadas na safra 2014/2015. Visando agrupar características, as variedades NS7901RR e TMG1180RR foram consideradas precoces, e as variedades TMG132RR e P98Y70 de ciclo médio.

Os grãos foram adquiridos de produtores do município de Sinop. O teor de água inicial das amostras foi de 0,28 e 0,30 (b.s) para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR, respectivamente, e, 0,23 e 0,19 (b.s) para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, respectivamente.

Inicialmente os grãos foram submetidos a um processo manual de limpeza, sendo separados os grãos avariados e as impurezas. O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por 24 h em três repetições de, aproximadamente, 30 g (BRASIL, 2009).

As amostras de grãos foram submetidas à secagem numa estufa de circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, sendo as mesmas dispostas em bandejas de chapa galvanizada, perfuradas ($\varnothing = 2,5$ mm), com dimensões médias de 320 x 260 x 50 mm contendo, aproximadamente, 750 g de produto em duas repetições.

Iniciada a secagem, a massa das amostras foi medida periodicamente, por meio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g. O teor de água durante a secagem foi determinado por diferença de massa conhecendo-se o teor de água inicial, até que se atingisse o teor de água final de pelo menos, 0,15 (b.s). Aos dados experimentais da secagem dos grãos de soja foram ajustados diferentes modelos matemáticos tradicionalmente utilizados em trabalhos científicos para a descrição da cinética de secagem de produtos agrícolas (BOTELHO, 2012; SANTOS et al., 2013; GONELI et al., 2014; CORRÊA FILHO et al., 2015), descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas

Descrição do modelo	Modelo	
Aproximação da Difusão	$RU = d \exp(-kt) + (1 - d) \exp(-kft)$	(1)
Dois Termos	$RU = d \exp(-kt) + f \exp(-gt)$	(2)
Logaritmo	$RU = d \exp(-kt) + f$	(3)
Midilli	$RU = d \exp(-kt^n) + ft$	(4)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$	(5)
Verma	$RU = d \exp(-kt) + (1 - d) \exp(-gt)$	(6)

em que:

RU é a razão de umidade, adimensional;

t é o tempo de secagem, min;

k é a constante de secagem, min^{-1} ; e

d, f, g e n são os coeficientes de ajustes dos modelos.

A razão de umidade do produto durante a secagem, para as diferentes temperaturas do ar foi determinada por meio da Equação 7.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_o - U_e} \quad (7)$$

em que:

U_t é o teor de água do produto num dado instante de tempo, % (b.s.);

U_e é o teor de água do produto em equilíbrio, % (b.s.); e

U_o é o teor inicial de água do produto, % (b.s.).

O teor de água de equilíbrio foi obtido a partir do modelo Oswin com seus coeficientes ajustados para o processo de dessorção, de acordo com a Equação 8 (AVIARA et al., 2004).

$$U_e = (19,024 + (-0,151T) \left[\frac{UR}{1 - UR} \right]^{1/3,72} \quad (8)$$

em que:

T é a temperatura absoluta (K); e

UR é a umidade relativa, (decimal).

Para o ajuste dos modelos matemáticos foi feita análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. O grau de ajuste do modelo foi avaliado por meio das magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P), sendo que, de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices, melhor o ajuste do modelo aos dados observados. Os valores de SE e P para cada modelo foram calculados pelas Equações 9 e 10, respectivamente:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (9)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (10)$$

em que:

Y é o valor observado experimentalmente;

\hat{Y} é o valor estimado pelo modelo;

n é o número de dados observados; e

GLR são graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

Além do erro médio relativo e do desvio padrão da estimativa foram considerados ainda a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e a tendência da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso).

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida (Equação 11) aos dados experimentais da secagem dos grãos de soja. Essa equação é a solução, pela série de Fourier, para a segunda lei de Fick, desconsiderando a variação volumétrica do produto, considerando a forma geométrica esférica e a condição de contorno de teor de água conhecido na superfície do produto (BOTELHO, 2012).

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t_s}{r_e^2}\right] \quad (11)$$

em que:

r_e é o raio equivalente do produto, m;

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

n é o número de termos em série; e

T_s é o tempo, s.

O raio equivalente foi obtido por meio de avaliação das dimensões características principais de uma amostra de 12 grãos para cada variedade, utilizando-se um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Conhecendo as dimensões características dos grãos de soja, o raio equivalente foi então calculado por meio da Equação 12 (ARAUJO et al., 2014; CAMICIA et al., 2015; SMANIOTTO et al., 2015).

$$r_e = \sqrt[3]{(abc)} \quad (12)$$

em que:

a é a maior dimensão característica do produto, m;

b é a dimensão característica intermediária do produto, m; e

c é a menor dimensão característica do produto, m.

A dependência da cinética de secagem, usualmente medida pelo coeficiente de difusão efetivo, com temperatura, normalmente é avaliada na literatura por meio da Equação 13, conhecida como Equação de Arrhenius. Por sua estrutura, torna-se possível verificar que a relação de $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura (T_a^{-1}) fornece uma reta cujo coeficiente angular permite estimar o valor da energia de ativação (OLIVEIRA et al., 2013; DERLAN et al., 2013; LEITE et al., 2015; ALMEIDA et al., 2015).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right) \quad (13)$$

em que:

D_0 é o fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$;

E_a é a energia de ativação, $J mol^{-1}$;

R é a constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$; e

T_a é a temperatura de secagem, K.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices estatísticos utilizados para seleção dos modelos matemáticos testados para descrever as curvas de secagem estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), coeficiente de determinação (R²), distribuição residual [DR, sendo tendenciosa (T) ou aleatória (A)] dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem dos grãos de soja

Modelo		Variedades precoces								
		NS7901RR				TMG1180RR				
		SE	P (%)	R ² (%)	DR	SE	P (%)	R ² (%)	DR	
Temperatura de secagem	40 °C	1	0,0132	2,16	99,89	T	0,0130	1,54	99,75	A
		2	0,0135	2,16	99,89	T	0,0133	1,57	99,75	A
		3	0,0216	3,03	99,69	T	0,0208	3,57	99,36	T
		4	0,0148	1,77	99,86	A	0,0147	1,66	99,70	A
		5	0,0156	1,98	99,83	A	0,0141	1,56	99,69	A
		6	0,0132	2,16	99,89	T	0,0245	3,79	99,11	T
	50 °C	1	0,0164	2,28	99,63	A	0,0415	7,079	98,54	T
		2	0,0146	1,99	99,73	A	0,0289	3,827	99,32	A
		3	0,0139	1,96	99,73	A	0,0284	3,874	99,32	A
		4	0,0142	2,39	99,75	A	0,0291	3,831	99,32	A
		5	0,0231	3,83	99,56	T	0,0296	4,259	99,23	A
		6	0,0289	5,30	98,84	T	0,0344	5,419	99,00	T
	60 °C	1	0,0266	4,18	99,29	T	0,0267	3,36	99,28	T
		2	0,0143	1,66	99,81	A	0,0172	2,04	99,72	A
		3	0,0142	1,67	99,80	A	0,0168	2,03	99,72	A
		4	0,0144	1,66	99,80	A	0,0172	2,04	99,72	A
		5	0,0155	2,16	99,75	T	0,0187	2,20	99,63	A
		6	0,0144	1,63	99,79	A	0,0166	2,02	99,72	A
	70 °C	1	0,0385	4,87	98,56	T	0,0553	7,87	97,54	T
		2	0,0094	1,12	99,92	A	0,0235	2,68	99,60	A
		3	0,0148	1,94	99,79	T	0,0276	3,97	99,39	A
		4	0,0098	1,16	99,92	A	0,0262	2,72	99,51	A
		5	0,0090	1,14	99,92	A	0,0246	2,72	99,47	A
		6	0,0089	1,12	99,92	A	0,0225	2,62	99,60	A

Tabela 3. Erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), coeficiente de determinação (R^2), distribuição residual [DR, sendo tendenciosa (T) ou aleatória (A)] dos modelos utilizados para a descrição das curvas de secagem dos grãos de soja

Modelo		Variedades de ciclo médio								
		TMG132RR				P98Y70				
		SE	P (%)	R ² (%)	DR	SE	P (%)	R ² (%)	DR	
Temperatura de secagem	40 °C	1	0,0159	2,72	99,65	A	0,0123	1,41	99,90	A
		2	0,0165	2,72	99,65	A	0,0134	1,41	99,90	A
		3	0,0312	4,11	98,64	T	0,0322	4,12	99,32	T
		4	0,0124	1,51	99,80	A	0,0120	1,21	99,92	A
		5	0,0265	4,34	98,95	T	0,0183	2,92	99,74	T
		6	0,0159	2,72	99,65	A	0,0130	1,30	99,89	A
	50 °C	1	0,0093	1,68	99,94	A	0,0083	1,60	99,96	A
		2	0,0096	1,69	99,94	A	0,0089	1,61	99,96	A
		3	0,0229	4,27	99,63	T	0,0340	5,84	99,27	T
		4	0,0108	1,90	99,92	A	0,0130	1,89	99,91	A
		5	0,0104	2,02	99,92	A	0,0126	2,37	99,89	T
		6	0,0201	3,43	99,72	T	0,0255	3,75	99,59	T
	60 °C	1	0,0212	1,51	99,69	A	0,0126	1,39	99,88	A
		2	0,0225	1,68	99,72	A	0,0141	1,40	99,88	A
		3	0,0202	1,58	99,72	T	0,0138	1,63	99,86	A
		4	0,0250	1,83	99,77	A	0,0140	1,29	99,88	A
		5	0,0195	1,74	99,69	T	0,0131	1,45	99,84	A
		6	0,0201	1,80	99,72	T	0,0126	1,39	99,88	A
70 °C	1	0,0117	1,39	99,85	A	0,0081	0,68	99,93	A	
	2	0,0122	1,41	99,85	A	0,0093	0,69	99,94	A	
	3	0,0133	1,52	99,80	A	0,0093	0,81	99,92	A	
	4	0,0114	1,31	99,87	A	0,0082	0,65	99,95	A	
	5	0,0155	1,82	99,70	A	0,0078	0,88	99,93	A	
	6	0,0117	1,39	99,85	A	0,0081	0,68	99,94	A	

Nota-se nas Tabela 2 e 3 que todos os modelos apresentaram baixas magnitudes dos valores do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P). Os modelos ajustados aos dados da modelagem matemática das variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR apresentaram valores de SE variando entre 0,0089 a 0,0385 e, 0,013 a 0,0553 respectivamente, enquanto que para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70 os valores de SE variaram entre 0,0093 a 0,0312 e, 0,0078 a 0,034, respectivamente. Para o desvio padrão da estimativa, os valores foram sempre menores que 10% para todas as

variedades e para todas as temperaturas do ar de secagem testadas, valor relatado como satisfatório em trabalhos de modelagem com modelos não-lineares (COSTA et al., 2011; SOUZA et al., 2011).

Apesar de não ser um critério confiável para a seleção de modelos não-lineares, o coeficiente de determinação normalmente apresenta maiores valores para os modelos de melhor ajuste (AVIARA et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2012). Nota-se, que para todas as condições de secagem testadas, os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, sendo este sempre maiores que 97,5% para as variedades precoces e 98,6% para as variedades de ciclo médio, sendo coerentes com as baixas magnitudes de erros encontradas.

Observa-se, na Tabela 2, que de todos os modelos ajustados aos dados observados da secagem da variedade NS7901RR, apenas o modelo de Midilli (4) apresentou distribuição aleatória dos resíduos para todas as temperaturas utilizadas. Para a variedade TMG1180RR, os modelos que apresentaram distribuição aleatória dos resíduos foram Dois termos (2), Midilli (4) e Page (5). Para as variedades TMG132RR e P98Y70 (Tabela 3), os modelos Aproximação da difusão (1), Dois termos (2) e Midilli (4) mostraram-se com distribuição aleatória em todas as condições de secagem testadas.

A distribuição dos resíduos é uma avaliação subjetiva, mas, normalmente, um modelo é considerado aceitável se os valores residuais se encontrarem em uma zona horizontal perto de zero, formando distribuições aleatórias. Se as distribuições dos resíduos formarem figuras geométricas, apresentarem regiões em que o modelo subestima ou superestima a condição real ou tenderem a se acumular em um ponto fora do eixo, a distribuição dos seus resíduos é considerada tendenciosa e o modelo é inadequado para representar o fenômeno em questão (BOTELHO, 2012).

A Figura 1 apresenta exemplos de distribuição de resíduos observados neste trabalho, sendo uma distribuição aleatória (A) e uma tendenciosa (B), para os modelos de Midilli e Verma, respectivamente, no ajuste dos dados de secagem da variedade TMG132RR na temperatura de 50 °C.

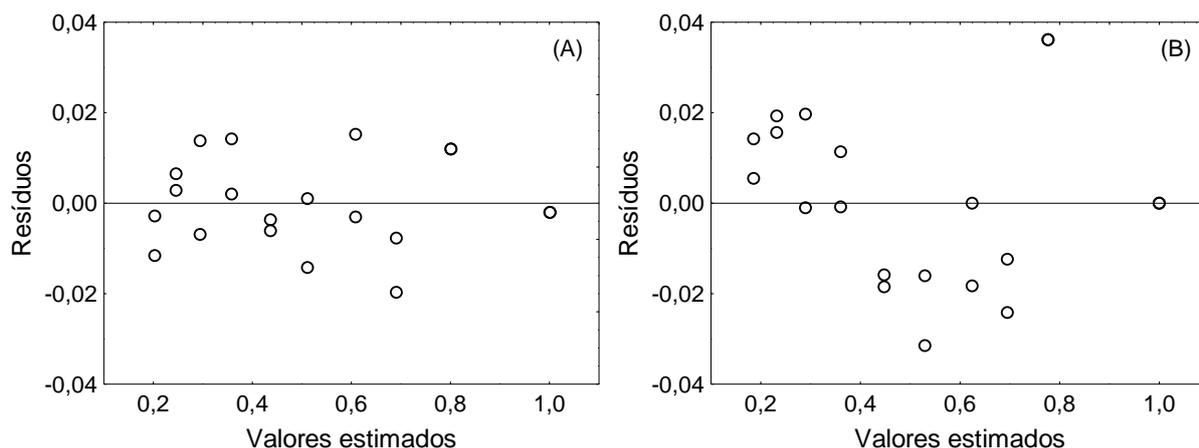


Figura 1 – Exemplos de distribuição de resíduos aleatória (A) e tendenciosa (B) referente à modelagem da cinética de secagem de grãos de soja da variedade TMG132RR.

Visou-se recomendar um modelo que tivesse maior abrangência possível para descrever a cinética de secagem das diferentes variedades de soja analisadas neste trabalho. Desta forma, dentre os modelos recomendados selecionou-se o de Midilli, visto que foi o único modelo com ajuste satisfatório em descrever a secagem em todas as condições propostas.

Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os coeficientes ajustados do modelo de Midilli para as variedades precoces e de ciclo médio, respectivamente, e para as diferentes temperaturas de secagem.

Tabela 3. Coeficientes ajustados do modelo de Midilli para secagem de grãos de soja das variedades NS7901RR e TMG1180RR

T (°C)	Variedades precoces							
	NS7901RR				TMG1180RR			
	a	k	n	b	a	k	n	b
40	0,9928	0,0098	0,7772	-0,0001	1,0046	0,0105	0,7870	0,00001
50	1,0018	0,0064	0,9455	0,0002	1,0126	0,0035	1,0444	0,0003
60	0,9929	0,0050	0,9913	0,0004	1,0007	0,0056	1,0210	0,0006
70	1,0039	0,0194	0,7937	0,0003	1,0006	0,0152	0,7876	0,0001

Tabela 4. Coeficientes ajustados do modelo de Midilli para secagem de grãos de soja das variedades TMG132RR e P98Y70

T (°C)	Variedades de ciclo médio							
	TMG132RR				P98Y70			
	a	k	n	b	a	k	n	b
40	0,9995	0,0390	0,4405	-0,0008	0,9997	0,0313	0,5183	-0,0005
50	1,0020	0,0191	0,7217	-0,0001	1,0027	0,0273	0,6313	-0,0001
60	1,0052	0,0035	1,1320	0,0006	0,9999	0,0118	0,8833	0,0004
70	0,9994	0,0055	1,1339	0,0014	0,9995	0,0147	0,8648	0,0007

O modelo de Midilli é um modelo tradicional, frequentemente considerado satisfatório por diversos autores que realizaram trabalhos semelhantes a este (SAFIEE et al., 2009; DARVISHI et al., 2014; PANDEY et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015).

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores observados experimentalmente e os estimados pelo modelo de Midilli com seus coeficientes em função da temperatura do ar de secagem para a descrição da cinética de secagem dos grãos de soja das variedades precoces e de ciclo médio.

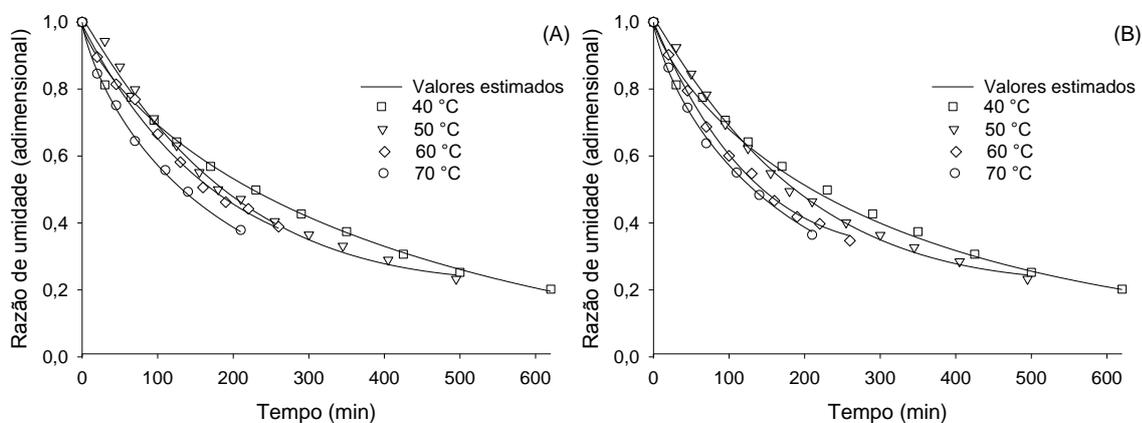


Figura 2. Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Midilli com seus coeficientes descritos em função da temperatura do ar de secagem para as variedades precoces NS7901RR (A) e TMG1180RR (B), respectivamente.

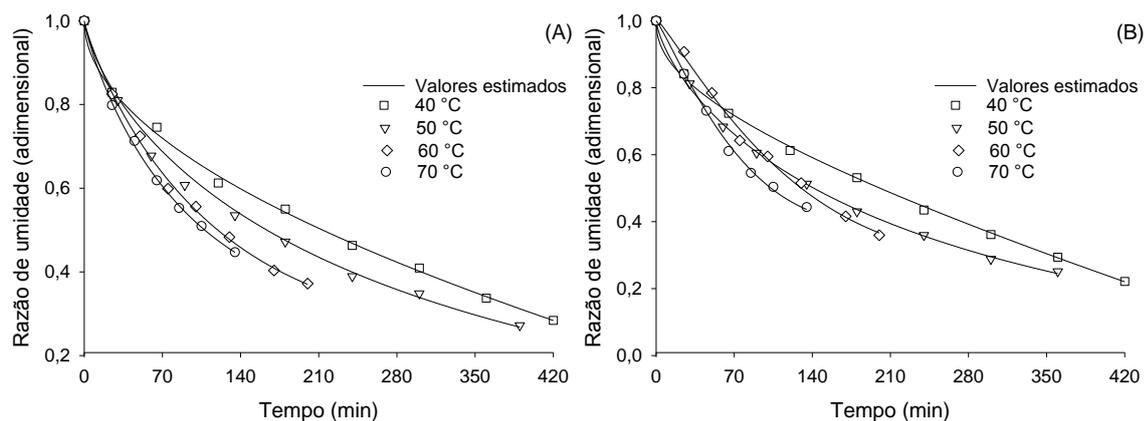


Figura 3. Correspondência entre os valores observados e os estimados pelo modelo de Midilli com seus coeficientes descritos em função da temperatura do ar de secagem para as variedades de ciclo médio P98Y70 (A) e TMG132RR (B), respectivamente.

Observou-se, nas Figuras 2 e 3, que as curvas de secagem apresentaram uma tendência exponencial típica observada em produtos agrícolas durante o período de secagem com taxa decrescente (MARTINS et al., 2014; CAMICIA et al., 2015). Além disso, nota-se uma correspondência satisfatória entre os dados observados experimentalmente e os dados estimados pelo modelos de Midilli, evidenciando que os índices estatísticos empregados foram eficazes para selecionar o modelo.

Verificou-se também que, de modo geral, ao aumentar a temperatura do ar, houve a diminuição do tempo de secagem. Ao elevar a temperatura aumenta-se o potencial de secagem do ar e a transferência de calor para o material, fazendo com que a velocidade de formação e migração do vapor d'água do interior para a superfície e ambiente seja maior. É evidente que a velocidade de secagem diminui continuamente com o tempo, de acordo com a proximidade do teor de água do material ao seu teor de água de equilíbrio.

Na Tabela 5, estão apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos de soja para as diferentes condições de temperatura do ar.

Tabela 5. Coeficientes de difusão efetivos de grãos de soja das variedades NS7901RR, TMG1180RR, TMG132RR e P98Y70, para diferentes temperaturas do ar de secagem

Temperatura (°C)	$D_{ef} \times 10^{-11} (m^2s^{-1})$			
	Variedades precoces		Variedades de ciclo médio	
	NS7901RR	TMG1180RR	TMG132RR	P98Y70
40	2,1763	2,5502	3,2688	2,7828
50	2,6652	2,6035	3,2705	3,2251
60	2,9467	2,9678	3,3311	3,8788
70	3,8721	4,2160	5,4595	4,3340

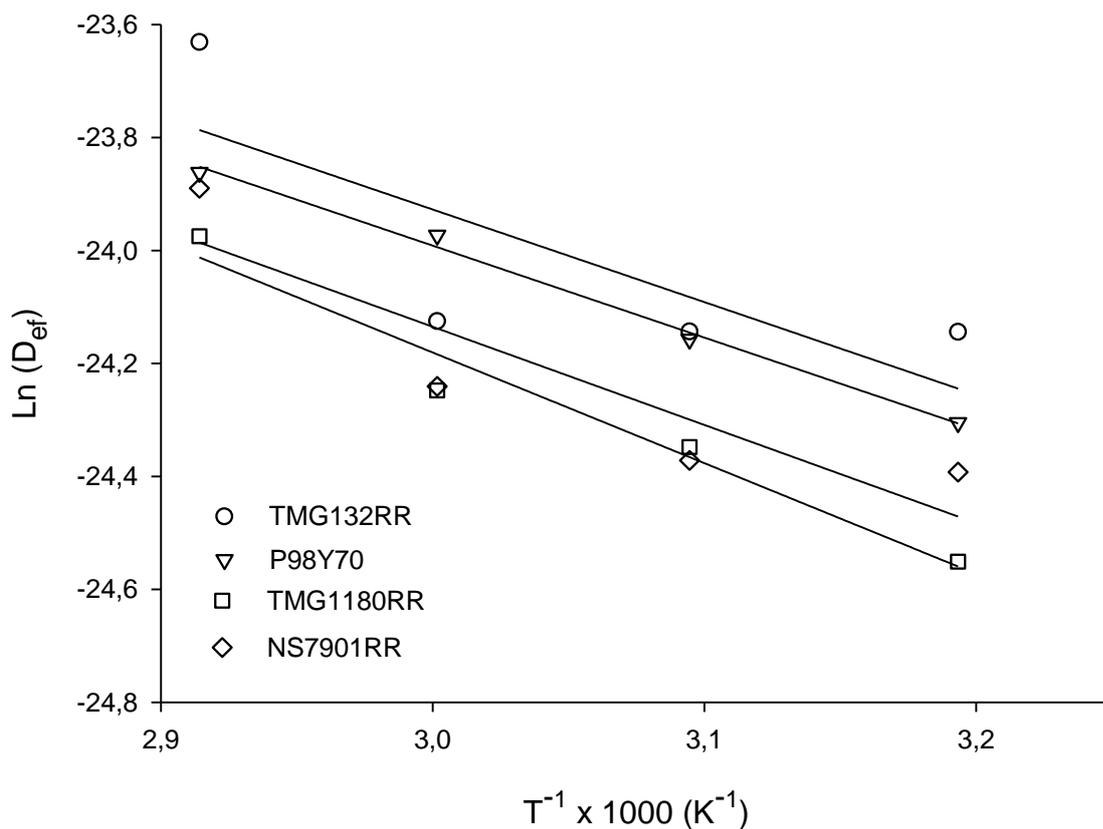
Os valores dos coeficientes de difusão efetivos de todas as variedades aumentaram com a elevação da temperatura do ar de secagem, sendo coerentes com os resultados citados na literatura para secagem de produtos agrícolas, que, segundo Madamba et al., (1996), apresentam valores da ordem de 10^{-11} a 10^{-9} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ (Tabela 5).

O coeficiente de difusão efetivo é um índice que possibilita avaliar a velocidade de secagem. Além disso sua dependência com a temperatura é frequentemente relatada em trabalhos similares à este, como Morais et al. (2013), que buscou determinar o coeficiente de difusão efetivo para grãos de feijão-caupi, e Souza et al. (2011), que o determinou para o nabo forrageiro. Com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, favorecendo a difusão do vapor d'água durante a secagem (GONELI et al., 2007).

Os valores obtidos tem como magnitudes os valores de $2,1763 \times 10^{-11}$ a $3,8721 \times 10^{-11}$ e $2,5502 \times 10^{-11}$ a $4,216 \times 10^{-11}$ para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR respectivamente, para intervalo de temperatura de 40 a 70°C e $3,2688 \times 10^{-11}$ a $5,4595 \times 10^{-11}$ e $2,7828 \times 10^{-11}$ a $4,3340 \times 10^{-11}$ para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70 respectivamente, para intervalo de temperatura de 40 a 70 °C.

Notou-se que os valores do coeficiente de difusão efetivo das variedades de ciclo médio foram sempre maiores do que as variedades precoces. Segundo Botelho et al. (2015), grãos de mesma espécie apesar de apresentarem constituição química semelhante, podem apresentar algumas variações físicas que ocorrem devido a características varietais, como o tamanho médio dos grãos e a relação superfície-volume. Além disso, de acordo com Almeida et al. (2015), o coeficiente de difusividade não é uma propriedade intrínseca ao material, pois varia com as condições de secagem e características do produto.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo de grãos de soja em relação à temperatura do ar de secagem foi satisfatoriamente representada pela equação de Arrhenius, conforme apresentado na Figura 4.



$$\begin{aligned}
 \text{NS7901RR: } \ln(D_{\text{ef}}) &= -18,30 - \frac{16,30}{8,314 \times T} & \text{P98Y70: } \ln(D_{\text{ef}}) &= -19,108 - \frac{13,53}{8,314 \times T} \\
 \text{TMG1180RR: } \ln(D_{\text{ef}}) &= -18,92 - \frac{14,45}{8,314 \times T} & \text{TMG132RR: } \ln(D_{\text{ef}}) &= -19,01 - \frac{13,64}{8,314 \times T}
 \end{aligned}$$

Figura 4. Relação da dependência do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) dos grãos de soja de diferentes variedades com a temperatura do ar de secagem, por meio da representação de Arrhenius.

Observa-se na Figura 4 que para a faixa de temperatura analisada (40 – 70 °C), a variação do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de soja para todas as variedades foram uniformes quando relacionados com a temperatura do ar de secagem, havendo elevada correspondência entre os dados observados e os estimados pela relação de Arrhenius.

A energia de ativação para a difusão de água nos grãos de soja durante o processo de secagem para a faixa de temperatura estudada foi de 16,30 e 14,45 kJ mol⁻¹ para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR e 13,34 e 13,53 kJ mol⁻¹ para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, respectivamente. Segundo Zogzas et al. (1996), a energia de ativação de produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, portando os valores encontrados neste trabalho estão coerente com os relatados na literatura.

A energia de ativação é a energia mínima necessária para que desencadeie o processo difusivo do vapor d'água no produto (KASHANINEJAD et al., 2007), podendo ser utilizada para comparar a secagem entre produtos diferentes. Nota-se que houve uma pequena diferença na energia de ativação entre as variedades precoces e que foi

praticamente nula para as variedades de ciclo médio. Ao comparar as variedades precoces com as de ciclo médio, observa-se que o primeiro grupo apresentou, de modo geral, energia de ativação maior do que o segundo. Todavia, é importante ressaltar que, visto a variabilidade possível de ocorrência de valores para a energia de ativação, pode-se dizer que a diferença total entre as variedades foi relativamente pequena, indicando que a secagem da soja muda pouco de uma variedade para outra.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados encontrados, nas condições em que foi realizado o experimento, conclui-se que para a variedade NS7901RR o modelo que melhor se ajustou aos dados observados da secagem foi o modelo de Midilli. Para a variedade TMG1180RR, foram os modelos Dois termos, Midilli e Page e para as variedades TMG132RR e P98Y70, os modelos Aproximação da difusão, Dois termos e Midilli apresentam ajuste satisfatório em todas as condições de secagem testadas.

O coeficiente de difusão efetivo, independentemente da variedade, aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, os valores obtidos tem como magnitudes os valores de $2,1763 \times 10^{-11}$ a $3,8721 \times 10^{-11}$ e $2,5502 \times 10^{-11}$ a $4,216 \times 10^{-11}$ para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR respectivamente, para intervalo de temperatura de 40 a 70 °C e $3,2688 \times 10^{-11}$ a $5,4595 \times 10^{-11}$ e $2,7828 \times 10^{-11}$ a $4,3340 \times 10^{-11}$ para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70 respectivamente, para intervalo de temperatura de 40 a 70 °C.

As variedades de ciclo médio apresentaram maiores valores do coeficiente de difusão efetivo e conseqüentemente apresentaram uma maior velocidade de secagem quando comparadas com as variedades precoces.

A energia de ativação para a difusão de água nos grãos de soja durante o processo de secagem para a faixa de temperatura estudada foi de 16,30 e 14,45 kJ mol⁻¹ para as variedades precoces NS7901RR e TMG1180RR e 13,34 e, 13,53 kJ mol⁻¹ para as variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70, respectivamente.

As maiores magnitudes, de modo geral, foram observadas na secagem das variedades precoces.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. N. C.; BERNI, J. V.; MEDEIRO, J. F.; SIQUEIRA, N. W.; PEREIRA, N. C. Cinética da secagem da semente de *Moringa oleifera* Lam. **In:** Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, p. 1638-1647, 2015.
- ARAÚJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES A.A.; VILHASANTI H.C.B. Propriedades físicas do amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 279–286, 2014.
- AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S. A. Sorption equilibrium and termo dynamic characteristics of soyabean. **Biosystems Engineering**, London, v. 87, p. 179–190, 2004.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.
- BOTELHO, F. M. Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de *Coffea canephora*. 2012. 141 p. **Tese** (Departamento de Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- BOTELHO, F. M.; GARCIA, T. R. B.; VIANA, J. L.; BOTELHO, S. C. C.; SOUSA, A. M. B. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, n. 2, p. 260-272, 2015.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. **Westport**: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CAMICIA, R. G. M.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M.; CAMICIA, R. F. M. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 206-214, 2015.
- CAVALCANTE, A. K.; SOUSA, L. B.; HAMAWAKI, O. T.; ARAUJO, G. O.; ROMANATO, F. N. Variabilidade genética de genótipos de soja de ciclo precoce no município de Uberaba-MG. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 5, n. 3, p. 115-119, 2010.
- CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Embrapa Cerrados**. Planaltina. DF, 2010. 51 p.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira - grãos safra 2014/2015: Décimo segundo levantamento**: setembro, 2015.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira - grãos safra 2015/2016: Oitavo levantamento**: maio, 2016.
- CORRÊA FILHO, L. C.; ANDRADE, E. T.; MARTINAZZO, A. P.; D'ANDREA, E. M.; SOUSA, F. A.; FIGUEIRA, V. G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 8, p. 797-802, 2015.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.

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

DARVISHI, H.; KHOSH TAGHAZA, M. H.; MINAEI, S. Fluidized Bed Drying Characteristics of Soybeans. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Teerã, v. 16, p. 1017-1031, 2014.

DERLAN, J. M.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; LEITE, A. L. M.; PASTRO, D. C. Análise da cinética de secagem de pimenta Cambuci em diferentes temperaturas e formas de processamento. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 9, n. 17, p. 97-107, 2013.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja** – região central do Brasil – 2012/2013. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2011. 261p.

EMBRAPA SOJA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja em números (safra 2014/2015)**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 23 maio. 2016.

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

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p. 56-64, 2014.

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**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.

IGUAZ, A.; SAN MARTIN, M. B.; MATÉ, J. I.; FERNANDEZ, T.; VÍRSEDA, P. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido* cultivar) at low drying temperatures. **Journal of Food Engineering**, London, v. 59, n. 2-3, p. 253-258, 2003.

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

KEEY, R.B. **Drying: Principles and practice**. New York: Pergamon Press. 1972. 358 p.

LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2015.

LORENZI, H.; MATOS, F.J. A. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas**. 2.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. 544 p.

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

MAGALHÃES, C. G. Análise da atividade de algumas enzimas antioxidantes em plantas de soja (*Glycine max* L. Merr.) sob níveis de manganês, em função da micorriza arbuscular. 2012. 102 p. **Dissertação** (Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz) Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; CESAR FILHO, P. H.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 238-244, 2015.

MARTINS, J. J. A.; MARQUES, J. I.; SANTOS, D. C. Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 6, p. 1652-1660, 2014.

MASKAN, M. Effect of processing on Hydration kinetics of three wheat products of the same variety. **Journal of Food Engineering**, London, v. 52, n. 4, p. 337-341, 2002.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, London, v.61, p.373-386, 2004.

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

NOWAK, D.; LEWICKI, P. P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5, n. 3, p. 353-360, 2004.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; BESSA, J. F. V.; KESTER, A. N.; SMANIOTTO, T. A. S. Mathematical modeling and thermodynamic properties for drying soybean grains. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, n. 1, p. 31-38, 2015.

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

OLIVEIRA, M. T. R.; BERBERT, P. C.; MARTINAZZO, A. P. Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2013.

OLIVEIRA, M. Temperatura na secagem e condições de armazenamento sobre propriedades da soja para consumo e produção de biodiesel. 2008. 70 p. **Dissertação** (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

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

PANDEY, S. K.; DIWAN, S.; SONI, R. Review of mathematical modelling of thin layer drying process. **International Journal of Current Engineering and Scientific Research**, v. 2, n, 11, p. 96-107, 2015.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.7, p.15-24, 2005.

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

RODOVALHO, R. S.; SILVA, H. W.; SILVA, I. L.; ROSSETO, C. A. V. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 8, n. 2, p. 128-142, 2015.

SAFIEE, S. H.; KEYHANI, A.; SHARIFI, M.; JAFARI, A.; MOBILI, H.; TABATABAEEFAR, A. Thin Layer Drying Properties of Soybean (*Viliamz* cultivar). **Journal of Agricultural Science and Technology**, Teerã, v. 11, p. 289-300, 2009.

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

SEDIYAMA, T. (Org.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina, PR: Mecenias, 2009. 314 p.

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, p. 560, 2008.

SILVA, L. C. Armazenagem: transporte de grãos. **Boletim técnico da Universidade Federal do Espírito Santo**, Espírito Santo, 2005.

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

SMANIOTTO, T. A. S.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SIQUEIRA, V. C.; SOUSA, K. A. Ajuste de modelos matemáticos a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja. **Revista Agroambiente**, Boa vista, v. 9, n. 4, p. 397-404, 2015.

SOUZA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

STRECK, N.A.; PAULA, G.M.; CAMERA, C.; MENEZES, N.L.; LAGO, I. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. **Bragantia**, Campinas, v.67, p.67-73, 2008.

USDA - Unisted States Departament of Agriculture. **World agricultural suppy and dem and estimates**. Disponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>>. Acesso em: 23 maio. 2016.

VERNETTI, F.J.; VERNETTI JUNIOR, F.J. Genética da soja: caracteres qualitativos e diversidade genética. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2009. 221p.

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.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 1. Coeficientes ajustados do modelo de Dois termos (2) e Page (5) para secagem de grãos de soja da variedade precoce TMG1180RR

T (°C)	Modelo	Variedade				
		TMG1180RR				
		a	k	b	G	n
40	2	0,7792	0,0022	0,2236	0,0148	-
	5	-	0,0104	-	-	0,7847
50	2	0,6167	0,0073	0,3846	0,0014	-
	5	-	0,0094	-	-	0,8423
60	2	0,9640	0,0058	0,0371	0,0055	-
	5	-	0,0087			0,8753
70	2	0,7174	0,0039	0,2875	0,0289	-
	5	-	0,0228	-	-	0,7358

Tabela 2. Coeficientes ajustados do modelo de Aproximação da difusão (1) e Dois termos (2) para secagem de grãos de soja das variedades de ciclo médio TMG132RR e P98Y70

T (°C)	Modelo	Variedades							
		TMG132RR				P98Y70			
		a	k	b	g	a	k	b	G
40	1	0,1002	0,4311	0,0071	-	0,1317	0,0820	0,0318	-
	2	0,8998	0,0031	0,1002	0,5370	0,8683	0,0026	0,1316	0,0820
50	1	0,2298	0,0250	0,1270	-	0,2508	0,0278	0,0951	-
	2	0,7705	0,0032	0,2301	0,0251	0,7495	0,0026	0,2523	0,0280
60	1	0,9999	0,0052	-4,4617	-	0,3217	0,0181	0,1752	-
	2	0,0028	-0,0107	1,0101	0,0055	0,3264	0,0178	0,6726	0,0031
70	1	0,9994	0,0071	-4,6953	-	0,2858	0,0245	0,1493	-
	2	0,0009	-0,0307	1,0021	0,0072	0,7074	0,0036	0,2913	0,0240

ANEXO B

Características físicas de sementes de soja da variedade NS7901RR segundo o produtor, Nidera Sementes, (<http://www.niderasementes.com.br/produto/ns-7901-rr.aspx>, acesso em 05-07-2016).

Pontos fortes:

- Precocidade,
- Alta produtividade,
- Excelente capacidade de engalhamento, e
- Ampla adaptação geográfica e época de plantio.

Crescimento:

- Indeterminado.

Colheita:

- 110 a 132 dias.

Características físicas de sementes de soja da variedade TMG1180RR segundo o produtor, Sementes Adriana, (<http://www.sementesadriana.com.br/produtos/soja/rr/tmg-1180-rr>, acesso em 05-07-2016).

Pontos fortes:

- Precocidade,
- Alta produtividade,
- Tolerante ao acamamento, e
- Bom desempenho em abertura de plantio.

Crescimento:

- Semi-indeterminado.

Colheita (médio norte – MT):

- 110 a 115 dias.

Características físicas de sementes de soja da variedade TMG132RR segundo o produtor, Sementes Adriana, (<http://www.sementesadriana.com.br/produtos/soja/rr/tmg-132-rr>, acesso em 05-07-2016).

Pontos fortes:

- Ampla adaptabilidade,
- Alta produtividade,
- Tolerante ao acamamento, e
- Associa estabilidade a teto produtivo.

Crescimento:

- Determinado.

Colheita (médio norte – MT):

- 118 a 122 dias.

Características físicas de sementes de soja da variedade P98Y70 segundo o produtor, Pioneer Sementes, (<http://www.pioneersementes.com.br/soja/central-de-produtos/produtos/p98y70>, acesso em 05-07-2016).

Pontos fortes:

- Elevado potencial produtivo,
- Bom desempenho em áreas com *Pratylenchus brachyurus*,
- Ampla adaptabilidade, e
- Bom desempenho em abertura de plantio.

Crescimento:

- Semi-determinado.

Colheita (médio norte – MT):

- 120 a 125 dias.