



Cinética de Secagem do Triticale em Diferentes Temperaturas: Avaliação Experimental e Ajuste de Modelos Matemáticos

Camila Nicola Boeri Di Domenico^{1*}, Rafael Diego Vargas¹

RESUMO: A secagem é uma etapa fundamental na pós-colheita de grãos, influenciando diretamente a conservação e a qualidade do produto armazenado. O triticale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack), cereal de crescente importância agrícola, requer controle adequado do teor de umidade para evitar perdas quantitativas e qualitativas. O objetivo deste trabalho foi avaliar experimentalmente a cinética de secagem do triticale em diferentes temperaturas do ar (40, 45, 50, 55, 60, 65 e 70 °C) e analisar o desempenho de modelos matemáticos na descrição do processo. Os ensaios foram conduzidos em estufas de circulação natural de ar, com monitoramento periódico da massa das amostras para determinação da razão de umidade ao longo do tempo. Os dados experimentais foram ajustados a sete modelos matemáticos amplamente utilizados na literatura, que foram avaliados com base no coeficiente de determinação e no erro médio relativo. Os resultados indicaram que o aumento da temperatura promoveu maior eficiência na remoção de umidade, com predominância do regime de taxa decrescente. Entre os modelos avaliados, o logarítmico apresentou melhor desempenho estatístico, descrevendo adequadamente a cinética de secagem do triticale. Conclui-se que a temperatura exerce influência significativa no processo e que modelos semiempíricos simples são adequados para a representação matemática da secagem do cereal.

Palavras-chave: pós-colheita; grãos; transferência de massa; modelagem matemática; cereais.

Drying Kinetics of Triticale at Different Temperatures: Experimental Evaluation and Mathematical Modeling

ABSTRACT: Drying is a crucial step in grain post-harvest systems, directly affecting storage safety and product quality. Triticale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack), a cereal of increasing agricultural relevance, requires adequate moisture control to minimize quantitative and qualitative losses. This study aimed to experimentally evaluate the drying kinetics of triticale at different air temperatures (40, 45, 50, 55, 60, 65, and 70 °C) and to assess the performance of mathematical models in describing the process. Drying experiments were carried out in natural air circulation ovens, with periodic mass measurements to determine the moisture ratio over time. Experimental data were fitted to seven mathematical models commonly used for agricultural products, and their performance was evaluated based on the coefficient of determination and mean relative error. Results showed that increasing temperature significantly enhanced moisture removal, with drying occurring predominantly in the falling-rate period. Among the evaluated models, the logarithmic model provided the best statistical performance, accurately representing triticale drying behavior. It is concluded that temperature strongly influences the drying process and that simple semi-empirical models are suitable for describing triticale drying kinetics.

Keywords: post-harvest; grains; mass transfer; mathematical modeling; cereals.

INTRODUÇÃO

O triticale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack), cereal de inverno resultante do cruzamento entre trigo (*Triticum spp.*) e centeio (*Secale cereale*), tem se consolidado como uma cultura de importância crescente na produção de grãos, especialmente em regiões de clima temperado e subtropical. Seu aspecto, bem como a tecnologia de cultivo, assemelha-se ao do trigo, e sua relevância decorre da combinação de características agrônomicas desejáveis, como maior resistência a estresses bióticos e abióticos, bom desempenho produtivo e qualidade nutricional elevada, fatores que sustentam

sua expansão como alternativa para alimentação humana e animal e uso industrial. Entretanto, assim como outras espécies de cereais, a manutenção da qualidade pós-colheita do triticale depende do teor de umidade, que precisa ser reduzido rapidamente após a colheita para evitar perdas quantitativas e a deterioração qualitativa, de natureza fisiológica, microbiológica e físico-química. Essas alterações constituem uma das principais dificuldades enfrentadas pelos produtores brasileiros, uma vez que as perdas durante o armazenamento podem atingir até 15% da produção (Embrapa, 2015).

A secagem é uma das etapas mais críticas na pós-colheita de produtos agrícolas. Em grãos, sua eficiência determina não apenas a segurança do armazenamento, mas também a preservação de propriedades essenciais, incluindo viabilidade germinativa, parâmetros tecnológicos para moagem e panificação e estabilidade bioquímica. O teor de água atua como variável-chave na atividade metabólica e na taxa de decomposição microbiana, de modo que valores acima dos limites recomendados aceleram processos deteriorativos, promovem o aquecimento, a fermentação e ataques fúngicos. Em tritcale, a necessidade de secagem é ainda mais pronunciada devido à sua fisiologia semelhante à do trigo e à sensibilidade a oscilações de umidade. Assim, a determinação de condições adequadas de operação, em especial da temperatura e do tempo de secagem, é fundamental para preservar a qualidade e minimizar os custos energéticos.

O entendimento da cinética de secagem, que descreve a evolução temporal do teor de umidade, é decisivo para o dimensionamento e controle de secadores. A dinâmica do processo resulta da interação entre fenômenos simultâneos de transferência de calor do ar para o grão, de evaporação da água na superfície e difusão interna da umidade do interior para a superfície. Em cereais, o período de taxa constante tende a ser reduzido ou inexistente, com predomínio do período de taxa decrescente, no qual o transporte interno, usualmente modelado pela segunda lei de Fick, constitui a principal resistência ao processo. A temperatura do ar de secagem exerce influência direta sobre o coeficiente efetivo de difusão, favorecendo a migração interna e as taxas de remoção da água do grão. Porém, a partir de um determinado nível, a temperatura pode comprometer a integridade estrutural e bioquímica do grão.

Para descrever quantitativamente esse comportamento, diferentes modelos matemáticos têm sido utilizados na literatura, variando de expressões empíricas a abordagens semiteóricas e difusionais (Coradi et al., 2016). A escolha do modelo adequado depende das características da curva experimental, da faixa de umidade, da temperatura e do objetivo da modelagem, podendo envolver critérios estatísticos, como o coeficiente de determinação, o erro médio relativo e a distribuição dos resíduos.

Apesar de existirem trabalhos envolvendo diferentes tipos de grãos, como soja, trigo, cevada, milho e arroz, a literatura específica sobre a cinética de secagem do tritcale ainda é menos abrangente, especialmente no que diz respeito a análises comparativas entre diferentes temperaturas de operação e ao ajuste de modelos matemáticos. Considerando a crescente importância da cultura e a necessidade de estabelecer parâmetros adequados

para uso em unidades armazenadoras, indústrias de processamento e sistemas agrícolas familiares, torna-se essencial produzir estudos experimentais que investiguem os efeitos da temperatura na redução da umidade do tritcale e avaliem a capacidade preditiva dos modelos mais empregados.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a secagem de grãos de tritcale em estufa em diferentes temperaturas (40 - 70 °C), quantificar a redução de sua umidade e discutir o comportamento da cinética, com enfoque particular na aplicabilidade e robustez de modelos matemáticos de secagem, contribuindo para a consolidação de parâmetros técnicos úteis ao manejo pós-colheita deste cereal.

MATERIAIS E MÉTODOS

Matéria-prima e preparo das amostras

Foram utilizados grãos de tritcale de um lote experimental, selecionados para garantir homogeneidade quanto ao tamanho e à integridade física dos grãos. As amostras foram acondicionadas em ambiente controlado, com temperatura de aproximadamente 25 °C e umidade relativa de cerca de 60%, até o início dos ensaios, de modo a minimizar variações indesejáveis no teor de umidade inicial.

Para cada condição experimental, foram preparadas amostras de aproximadamente 100 g, destinadas à determinação da cinética de secagem. Adicionalmente, a partir da amostra geral de grãos, foram retiradas subamostras independentes de aproximadamente 15 g, utilizadas para a determinação do teor de umidade inicial. As amostras de 100 g foram acondicionadas em bandejas perfuradas, o que permitiu a circulação adequada de ar durante o processo de secagem. Os procedimentos seguiram metodologia padrão para estudos de secagem de grãos (Instituto Adolfo Lutz, 2008).

Condições experimentais de secagem

Os ensaios de secagem foram conduzidos em estufas de circulação natural de ar, operando a temperaturas de 40, 45, 50, 55, 60, 65 e 70 °C. Cada condição de temperatura foi avaliada em duplicata, ou seja, duas amostras de 100 g.

Antes do início de cada experimento, as estufas foram estabilizadas na temperatura desejada, com variação máxima admissível de ± 1 °C. As amostras foram posicionadas em bandejas perfuradas, de modo a permitir a exposição uniforme ao ambiente térmico interno da estufa, reduzindo os efeitos de gradientes de temperatura.

Durante o processo, as amostras foram retiradas das estufas em intervalos regulares para determinação da massa: a cada 20 minutos nas primeiras duas horas e, posteriormente, a cada 30 minutos até o final do

experimento, com duração total de 3h. O tempo total de secagem foi padronizado em 3h para todos os experimentos, permitindo comparações diretas entre as diferentes temperaturas.

Determinação do teor de umidade

O teor de umidade dos grãos foi determinado pelo método da estufa, a 105 ± 1 °C, por 24 horas, conforme procedimentos padronizados para cereais (Brasil, 2009). Esse procedimento tem como finalidade exclusiva a determinação do teor de umidade, não se relacionando à preservação da viabilidade fisiológica das sementes.

Os valores de umidade foram expressos em base seca (% b.s.), considerando-se como referência a massa da matéria seca obtida após a secagem das amostras nessas condições. O teor de umidade inicial foi determinado antes do início dos experimentos de secagem, enquanto o teor final foi obtido ao término de cada experimento realizado, levando-se a amostra seca para o mesmo procedimento do método da estufa.

A redução absoluta de umidade foi calculada como a diferença entre os teores iniciais e finais, permitindo avaliar o efeito da temperatura na remoção de água dos grãos de triticale.

Análise da cinética de secagem

A cinética de secagem foi descrita a partir da razão de umidade adimensional (X), definida como:

$$X = \frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} \quad (\text{Equação 1})$$

em que U_t é o teor de umidade no tempo t , U_0 é o teor inicial e U_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio.

Modelagem matemática da secagem

Os dados experimentais da cinética de secagem do triticale foram ajustados a sete modelos matemáticos amplamente utilizados na literatura para secagem de produtos agrícolas: Newton, Henderson e Pabis, Logarítmico, Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Wang e Singh e Aproximação da Difusão. Esses modelos expressam a razão de umidade em função do tempo de secagem e incluem parâmetros empíricos e constantes associadas à taxa de secagem. As equações do modelo são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para descrever a cinética de secagem do triticale em função do tempo de secagem (t), com seus respectivos parâmetros e constantes.

Modelo	Equação geral
Newton	$X = \exp(-kt)$

Modelo	Equação geral
Henderson & Pabis	$X = a \exp(-kt)$
Logarítmico	$X = a \exp(-kt) + c$
Dois Termos	$X = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Exponencial de Dois Termos	$X = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Wang & Singh	$X = 1 + at + bt^2$
Aproximação da Difusão	$X = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$

Fonte: Baidhe e Clementson (2024)

Nos modelos descritos na Tabela 1, X representa a razão de umidade (adimensional); t é o tempo de secagem (min); a , b e c são parâmetros empíricos dos modelos (adimensionais); k , k_0 e k_1 são constantes de secagem (tempo^{-1}), relacionadas à taxa de remoção de umidade.

Os parâmetros dos modelos foram estimados por regressão não linear utilizando o método de Levenberg–Marquardt no software Statistica 7.0. Diferentes estimativas iniciais foram testadas para garantir a convergência dos ajustes.

Avaliação do desempenho dos modelos

O desempenho dos modelos foi avaliado com base no coeficiente de determinação (R^2) e no erro médio relativo (P). Valores de $P < 10\%$ foram considerados indicativos de bom ajuste, conforme descrito por Mohapatra e Rao (2005). Adicionalmente, realizou-se uma análise qualitativa da distribuição dos resíduos para identificar possíveis desvios sistemáticos.

Os modelos foram comparados quanto à capacidade de descrever adequadamente o comportamento experimental da secagem do triticale nas diferentes temperaturas, considerando-se simultaneamente a precisão estatística e a simplicidade estrutural das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teores de Umidade Inicial e Final dos Grãos de Triticale

Os valores da umidade inicial das 14 amostras de 100 g submetidas às 7 temperaturas de secagem variaram em uma faixa estreita, entre 13,42% e 14,51% em base seca, evidenciando a homogeneidade do lote experimental e a adequação do preparo das amostras. Em contraste, a umidade final diminuiu sistematicamente com o aumento da temperatura de secagem, atingindo valores de 11,94% b.s. a 40 °C e de 7,21% b.s. a 70 °C, respectivamente, conforme se pode observar na Tabela 2 e Gráfico 1.

Tabela 2. Teores de umidade inicial, umidade final e redução absoluta de umidade do grão triticale em diferentes temperaturas de secagem

Temperatura (°C)	U_0 (% b.s.)	U_f (% b.s.)	$\Delta = U_0 - U_f$ (% b.s.)
40	14,17	11,94	2,23
45	14,33	11,12	3,21
50	13,89	10,01	3,88
55	14,51	9,01	5,50
60	13,74	8,15	5,59
65	13,42	7,67	5,75
70	14,21	7,21	7,00

Fonte: Dados dos autores (2025)

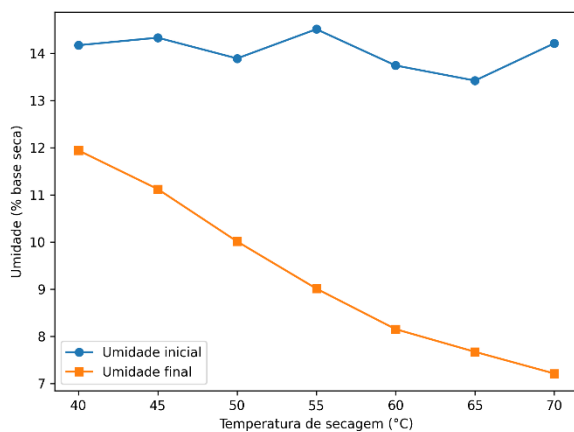


Gráfico 1 – Teores de umidade inicial e final do triticale em função da temperatura de secagem (Fonte: Dados dos autores, 2025)

A redução absoluta média de umidade ($\Delta = U_0 - U_f$) apresentou comportamento crescente com a elevação da temperatura, passando de cerca de 2,2% b.s. na menor temperatura de secagem, para 7% b.s. nos ensaios realizados a 70 °C, como visto no gráfico 2:

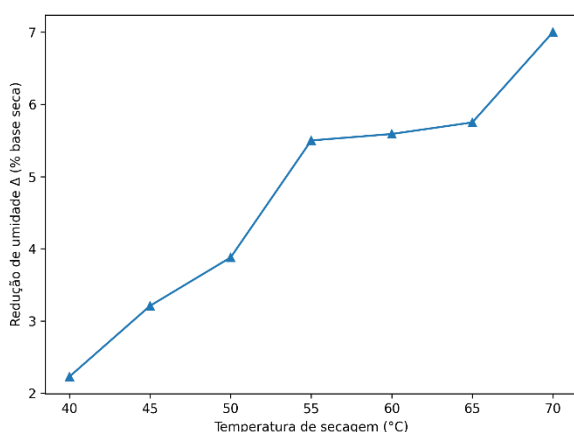


Gráfico 2 – Redução absoluta de umidade do triticale em função da temperatura de secagem (Fonte: Dados dos autores, 2025)

Esse comportamento confirma a forte influência da temperatura na remoção de água dos grãos, um efeito amplamente documentado na literatura para

cereais, como trigo, cevada e milho. O aumento da temperatura intensifica o gradiente de pressão de vapor entre o interior do grão e o meio externo, além de reduzir a viscosidade da água, favorecendo a difusão interna e a evaporação superficial. Para o triticale, cuja estrutura endospermica é relativamente compacta, esse efeito torna-se particularmente relevante para a determinação do tempo ótimo de secagem, uma vez que temperaturas mais elevadas podem acelerar significativamente o processo, reduzindo o tempo necessário para atingir o teor de umidade desejado, sem comprometer, entretanto, a qualidade do produto quando adequadamente controladas.

Influência da temperatura na eficiência do processo de secagem

A análise dos dados experimentais evidencia que a elevação da temperatura resulta em um aumento significativo da eficiência da secagem, expresso pela maior redução de umidade dos grãos (Gráfico 3). O efeito positivo da temperatura é visualizado nos momentos iniciais da secagem dos grãos. Por exemplo, após 20 minutos de secagem há uma nítida separação entre a razão de umidade para cada temperatura, sendo a mais eficiente a de 70 °C. Em contraste, aos 150 minutos de secagem, nota-se a aproximação dos valores das razões de umidade para as temperaturas de secagem entre 45 °C e 70 °C, notadamente entre 60 °C e 70°C, as quais se mostram relativamente próximas na eficiência de secagem, e mais eficientes do que a observada para a temperatura de 40 °C. O incremento observado entre 60 e 70 °C é especialmente expressivo, indicando que, nessa faixa, o processo passa a operar com coeficientes de difusão efetiva substancialmente maiores.

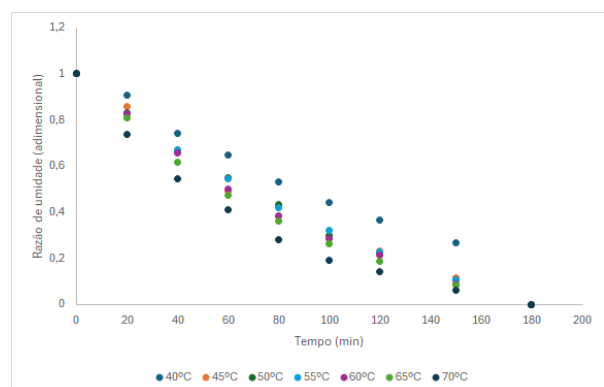


Gráfico 3 – Comparação entre as curvas de secagem do triticale em diferentes temperaturas (Fonte: Dados dos autores, 2025)

Esse comportamento é coerente com a dependência do coeficiente de difusão hídrica em relação à temperatura, frequentemente descrita por uma lei de Arrhenius. Pequenos aumentos de temperatura podem provocar elevações exponenciais na mobilidade da água no interior do grão, o que

explica a redução acentuada da umidade final observada nos ensaios de maior temperatura.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que temperaturas iguais ou superiores a 60 °C são mais eficazes para obter teores de umidade compatíveis com o armazenamento seguro do triticale. Entretanto, a literatura ressalta que temperaturas elevadas podem acarretar danos térmicos ao grão, como fissuras, degradação do amido e redução da qualidade tecnológica, o que sugere a necessidade de um compromisso entre a eficiência de secagem e a preservação da qualidade do produto.

Comportamento da cinética de secagem do triticale

A dinâmica observada durante os ensaios permite inferir que a secagem do triticale ocorreu predominantemente no período de taxa decrescente, característica comum em grãos.

A ausência de um período de taxa constante bem definido indica que a resistência interna à transferência de massa é o principal fator limitante do processo. Nessa condição, a migração da água do interior para a superfície do grão ocorre principalmente por difusão líquida e vapor, sendo fortemente dependente da temperatura.

Esse comportamento está de acordo com estudos prévios sobre cereais de estrutura semelhante, nos quais a secagem é majoritariamente controlada por mecanismos internos desde os estágios iniciais do processo. Assim, o aumento da temperatura atua diretamente sobre o coeficiente efetivo de difusão, acelerando a cinética e reduzindo o tempo necessário para atingir teores seguros de umidade.

Desempenho dos modelos matemáticos de secagem

De modo geral, os modelos exponenciais e semiempíricos apresentaram melhor desempenho na representação da cinética do triticale (Quadro 1):

Quadro 1 - Análise estatística dos modelos ajustados (Fonte: Dados dos autores, 2025).

T (°C)	Parâmetros	Modelos						
		1	2	3	4	5	6	7
40	P (%)	4,471295195	4,78726	5,32509	4,78661	4,471	5,2982	4,96205
	R²	0,96567998	0,97023	0,99362	0,97023	0,96568	0,99353	0,98264
45	P (%)	7,261732576	6,46673	5,05927	-	7,26219	5,89655	3,25244
	R²	0,98687623	0,98954	0,99794	-	0,98687	0,99743	0,99653
50	P (%)	11,49191055	10,0797	1,73758	-	11,4941	2,47389	5,18443
	R²	0,98460615	0,98684	0,99967	-	0,9846	0,99954	0,99505
55	P (%)	11,00359272	9,96289	0,77133	-	11,0046	1,97624	5,35595
	R²	0,98514746	0,98701	0,99994	-	0,98515	0,99967	0,99501
60	P (%)	10,45318748	9,47627	1,7565	-	10,4543	3,22629	5,25844
	R²	0,98836421	0,99014	0,99962	-	0,98836	0,99922	0,99671
65	P (%)	9,754468416	8,87024	1,51073	-	9,75536	4,56594	6,71695
	R²	0,99176317	0,99292	0,99978	-	0,99176	0,99987	0,99543
70	P (%)	7,650298819	7,07506	2,70418	-	7,65194	10,4687	3,9487
	R²	0,99696098	0,99714	0,99976	-	0,99696	0,99592	0,9986

* Modelos: 1 – Modelo de Newton; 2 – Modelo de Henderson & Pabis; 3 – Modelo Logarítmico; 4 – Modelo de Dois Termos; 5 – Modelo Exponencial de Dois Termos; 6 – Modelo de Wang & Singh; 7 – Modelo de Aproximação da Difusão; R²: coeficiente de determinação; P: erro médio relativo

O modelo logarítmico destacou-se por apresentar bom ajuste aos dados experimentais em diversas condições de temperatura, com valores elevados de coeficiente de determinação e erro médio relativo inferior a 10%, critério amplamente aceito na literatura como indicativo de ajuste satisfatório, conforme pode ser constatado nos gráficos 4 a 10:

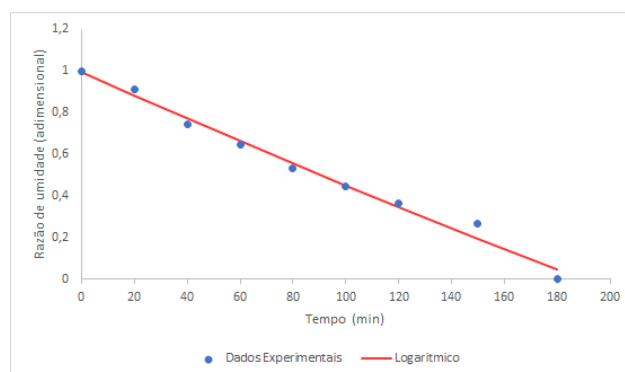


Gráfico 4 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 40°C (Fonte: Dados dos autores, 2025)

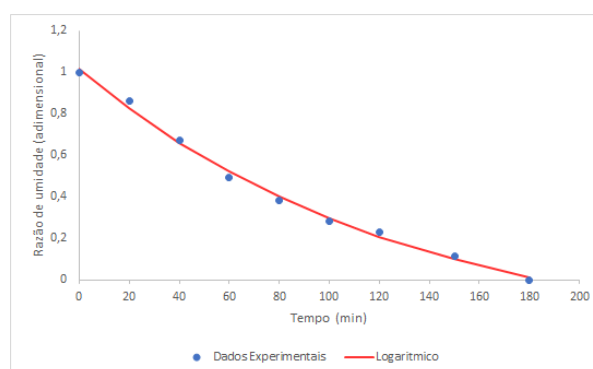


Gráfico 5 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 45°C (Fonte: Dados dos autores, 2025)

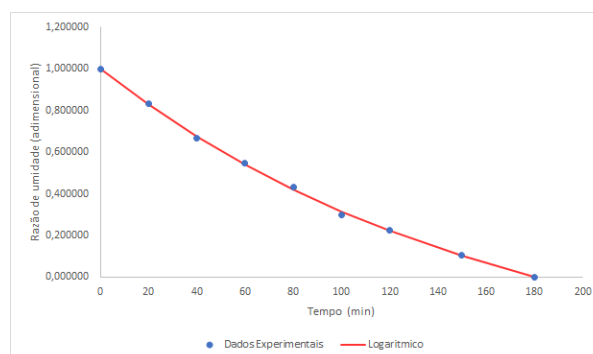


Gráfico 6 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 50°C (Fonte: Dados dos autores, 2025).

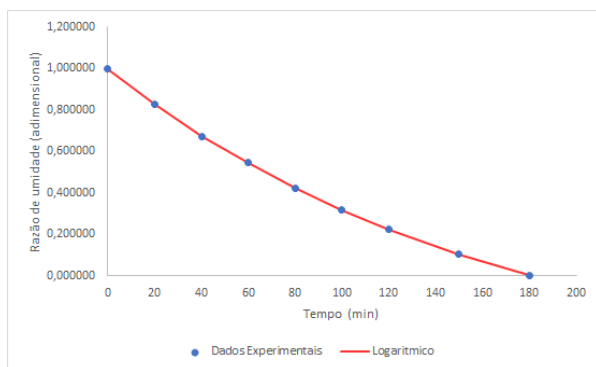


Gráfico 7 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 55°C (Fonte: Dados dos autores, 2025)

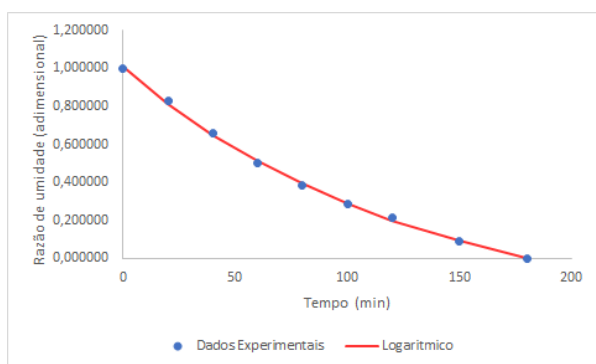


Gráfico 8 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 60°C (Fonte: Dados dos autores, 2025)

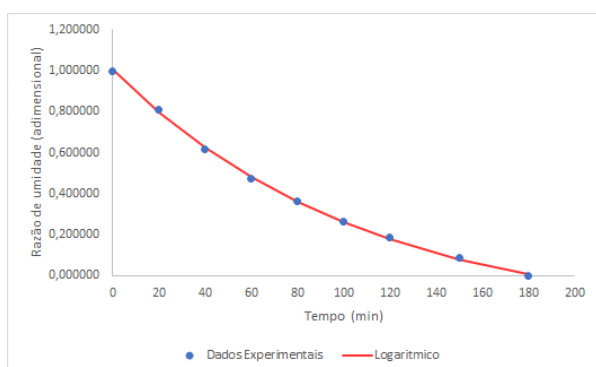


Gráfico 9 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 65°C (Fonte: Dados dos autores, 2025)

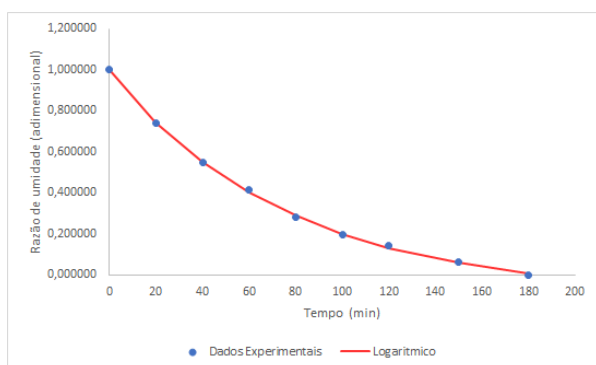


Gráfico 10 - Dados simulados pelo modelo logarítmico para a secagem a 70°C (Fonte: Dados dos autores, 2025)

Esse resultado é consistente com trabalhos que relatam a eficiência do modelo logarítmico para cereais, devido à sua flexibilidade para representar as curvaturas típicas do regime de taxa decrescente (Camicia et al., 2016; Moraes et al., 2013; Meneghetti et al., 2012; Corrêa et al., 2007).

O modelo de Dois Termos, apresentou dificuldades de convergência para as condições experimentais de 45° a 70°, fenômeno frequentemente observado em regressões não lineares com maior número de parâmetros. Tais dificuldades podem ser atribuídas à sensibilidade desses modelos às estimativas iniciais e à variabilidade inerente aos dados experimentais.

Os resultados indicam que, para o triticale e nas condições avaliadas, modelos com dois ou três parâmetros são suficientes para descrever adequadamente o processo de secagem, oferecendo um bom compromisso entre precisão estatística e simplicidade matemática.

Implicações tecnológicas e aplicabilidade dos resultados

Os resultados obtidos têm implicações diretas para a prática agrícola e industrial. A clara influência da temperatura sobre a taxa de remoção de umidade reforça a importância do controle térmico em sistemas de secagem de triticale. Temperaturas moderadamente elevadas, como as avaliadas neste estudo, permitem alcançar teores de umidade seguros de armazenamento em menor tempo, reduzindo os riscos de deterioração microbiológica e de perdas pós-colheita.

Além disso, a adequação dos modelos matemáticos avaliados permite sua aplicação em simulações e no dimensionamento de secadores, contribuindo para a otimização de processos industriais, como observado em Martins (2015) e Vilela e Artur (2008). A utilização de modelos simples e robustos, como o logarítmico, facilita a implementação em sistemas de controle e previsão do tempo de secagem, especialmente em unidades armazenadoras e agroindústrias de pequeno e médio porte (Hoscher et. al., 2015).

Por fim, os resultados reforçam a necessidade de estudos complementares que avaliem, além da cinética de secagem, os efeitos da temperatura sobre a qualidade física, fisiológica e tecnológica do triticale, ampliando a aplicabilidade dos dados obtidos.

CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar experimentalmente a secagem do triticale em diferentes temperaturas e analisar o comportamento do processo por meio de modelos matemáticos

amplamente utilizados na literatura. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

O teor de umidade final do triticale apresentou forte dependência da temperatura de secagem, reduzindo-se progressivamente com o aumento da temperatura na faixa de 40 a 70 °C, evidenciando a influência direta das condições térmicas sobre a eficiência do processo.

Temperaturas iguais ou superiores a 60 °C mostraram-se mais eficientes na remoção de água, proporcionando reduções absolutas de umidade significativamente maiores no mesmo intervalo de tempo experimental, alcançando valores compatíveis com o armazenamento seguro de grãos.

A cinética de secagem do triticale ocorreu predominantemente no regime de taxa decrescente, indicando que a resistência interna à transferência de massa é o principal mecanismo limitante do processo, comportamento típico de cereais de estrutura endospermica compacta.

Entre os modelos matemáticos avaliados, o modelo logarítmico apresentou melhor desempenho na descrição da cinética de secagem do triticale, com elevados coeficientes de determinação e baixos erros médios relativos, o que o configura como uma alternativa simples, robusta e adequada para aplicações práticas.

Modelos com maior número de parâmetros apresentaram dificuldades de convergência em algumas condições experimentais (45°C a 70°C), indicando que, para os dados analisados, modelos semiempíricos de menor complexidade são suficientes para representar adequadamente o processo.

Os resultados obtidos contribuem para a compreensão do comportamento higrótérmico do triticale durante a secagem e fornecem subsídios técnicos para a escolha de condições operacionais e para a modelagem de sistemas de secagem aplicados à pós-colheita desse cereal.

De forma geral, o estudo reforça a importância do controle da temperatura e da modelagem matemática como ferramentas fundamentais para a otimização dos processos de secagem de grãos, destacando o potencial de aplicação dos resultados em unidades armazenadoras e em agroindústrias.

REFERÊNCIAS

- BAIDHE, E.; CLEMENTSON, C. L. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 222, 109094, 2024.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: MAPA, 2009. 399 p. Disponível em: [https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise_sementes.pdf)
- agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise_sementes.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.
- CAMICIA, Rafaela et. al. Solução Numérica do Processo de Secagem das Sementes de Canola Baseada em Métodos de Regressão Não-Lineares. **CNMAC (2016): Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**, v. 5 n. 1, 2017.
- CORADI, P. C.; FERNANDES, C. H. P.; HELMICH, J. C. Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 385-392, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n4p385-392>. Disponível em: <http://www.scielo.br/reader/>. Acesso em: 28 set. 2025.
- CORRÊA, Paulo C. et. al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Revista Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Armazenamento inadequado de grãos resulta em cerca de 15% de perdas**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/3860638/armazenamento-inadequado-de-graos-resultado-em-cerca-de-15-de-perdas>. Acesso em: 29 set. 2025.
- HOSCHER, R. H. et. al. **Modelagem matemática da secagem de grãos de soja**. VII Congresso Brasileiro de Soja, 2015.
- MARTINS, Elton A. S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, 2015.
- MENEGHETTI, Volnei L. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.10, p.1115–1120, 2012.
- MOHAPATRA, Debabandya; RAO, P. Srinivasa. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877404001888>. Acesso em: 29 set. 2025.
- MORAIS, Simone J. S. et. al. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.
- VILELA, C.A.A.; ARTUR, P.O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.2, p.387-394, 2008.