



## MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL APLICADA À SECAGEM DE GRÃOS<sup>1</sup>

Patrick Stiehl Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trabalho de pesquisa realizado na disciplina de Modelagem Matemática do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - UNIJUI

<sup>2</sup> Mestrando em Modelagem Matemática e Computacional, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI

### RESUMO

Este artigo analisa a importância da secagem de grãos na produção agrícola e revisa alguns modelos matemáticos utilizados para otimizar esse processo. A metodologia utilizada envolveu uma revisão de literatura abrangente, incluindo a análise de artigos científicos e teses de mestrado, descrevendo métodos empíricos, semi-empíricos e físicos, com buscas realizadas em fontes como *Google Scholar* e periódicos especializados. Estudos específicos demonstram a eficácia de modelos como Aproximação por Difusão, Midilli e Page em diferentes condições, destacando a necessidade de validação contínua para garantir a eficiência e qualidade na secagem de grãos.

**Palavras-chave:** Secagem de grãos. Modelos matemáticos. Eficiência agrícola. Preservação de grãos.

### ABSTRACT

This article analyzes the importance of grain drying in agricultural production and reviews several mathematical models used to optimize this process. The bibliographic research included scientific articles and theses, describing empirical, semi-empirical, and physical methods. The methodology involved a comprehensive literature review, including the analysis of scientific articles and master's theses, with searches conducted in sources such as Google Scholar and specialized journals. Specific studies demonstrate the effectiveness of models such as Diffusion Approximation, Midilli, and Page under various conditions, highlighting the need for continuous validation to ensure efficiency and quality in grain drying.

**Keywords:** Grain drying. Mathematical models. Agricultural efficiency. Grain preservation.

### INTRODUÇÃO

A secagem de grãos desempenha um papel importante na produção agrícola, sendo fundamental para a preservação, armazenamento e comercialização de vários tipos de grãos, que incluem feijão, milho, soja, entre outros. Este processo é essencial para garantir a qualidade e segurança dos grãos. Após a colheita, os grãos frequentemente retêm um teor de umidade elevado. A umidade excessiva não apenas compromete a qualidade dos grãos, mas também serve como um ambiente propício para o desenvolvimento de fungos e microrganismos,









secagem em estufas sob monitoramento constante até atingir massa estável, sendo realizadas avaliações frequentes de peso como parte do monitoramento. Segue a tabela de modelos analisados pelos autores:

**Tabela 1.** Modelos matemáticos

Designação do modelo	Modelo
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	Aproximação da Difusão
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	Exponencial de Dois Termos
$RX = a \exp(-k t)$	Henderson e pabis
$RX = a \exp(-k t) + c$	Logarítmico
$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	Midilli
$RX = \exp(-k t)$	Newton
$RX = \exp(-k t^n)$	Page
$RX = \exp((-a(a^2 + 4 b t)^{0,5}) / 2 b)$	Thompson
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Singh

RX - razão de umidade do produto, adimensional; t - tempo de secagem, h; k - constantes de secagem, h<sup>-1</sup>, e a, b, c, n - coeficientes dos modelos

**Fonte:** Produzida pelo autor com base no trabalho de (De Carvalho Melo et al., 2016)

Foram utilizados diversos modelos matemáticos e seu desempenho foi verificado por diferentes critérios estatísticos. Estes incluíram avaliação baseada no erro médio estimado (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Os resultados apontaram dois modelos Aproximação por Difusão e Midilli como os mais confiáveis na secagem de grãos sob temperaturas variadas. Notavelmente, a eficácia do modelo de Aproximação por Difusão atingiu o pico a 55 °C, enquanto o de Midilli foi em 35 e 65 °C. De acordo com De Carvalho Melo et al. (2016), os modelos não apenas apresentam coeficiente de determinação próximo a 100%, indicando um bom ajuste aos dados, mas também são considerados capazes de representar fenômenos de transferência de massa e calor durante a secagem.

Pode-se concluir sobre esse estudo, que além da contribuição para o conhecimento da modelagem matemática na secagem de grãos de feijão carioca, também fornece informações úteis para otimizar processos relacionados a secagem de produtos agrícolas, tendo maior eficiência e qualidade dos produtos finais.



Nos estudos realizados por Di Domenico et al. (2015), eles focaram nos modelos da exponencial e de Page, os quais são amplamente utilizados, ambos são conhecidos por sua simplicidade, onde o modelo da exponencial considera apenas a variável tempo para descrever a secagem. Enquanto o modelo de Page é capaz de capturar com maior precisão as variantes da secagem, tornando mais adequado para descrever a dinâmica de secagem durante todo o período.

Os autores realizaram simulações da secagem de uma variedade de produtos, essas simulações foram baseadas em dados da literatura e em experimentos próprios, foi utilizado o Excel para construir os gráficos e visualização de dados de secagem. Além disso, o *Matlab* foi utilizado para realizar a otimização dos parâmetros dos modelos, especificamente os valores das constantes  $k$  e  $z$ . Essa combinação gerou uma análise mais direta e detalhada da secagem, assim ajustando os modelos às condições de cada experimento.

**Tabela 2.** Tabela das simulações pelo modelo da exponencial.

Produto	Parâmetro $k$	Coeficiente de	
		Correlação de Pearson	Erro padrão médio
Abacaxi	0,206	0,983	4,48%
Amendoim	0,013	0,992	3,50%
Bacalhau	0,015	0,987	2,49%
Café	0,565	0,962	10,42%
Feijão Preto (35°)	0,320	0,991	4,35%
Feijão Preto (45°)	0,550	0,973	7,36%
Feijão Vermelho (35°)	0,363	0,991	4,86%
Feijão Vermelho (45°)	0,620	0,996	1,36%
Microalga <i>Spirulina platensis</i>	0,021	0,996	2,53%
Quitosana de resíduos de camarão	2,244	0,999	1,48%

**Fonte:** Produzida pelo autor com base nos dados de (Di Domenico et al., 2015)





**Tabela 4.** Valores utilizados na realização dos experimentos práticos.

VARIÁVEIS	VALOR
Umidade do Ar (%)	40
Pressão Atmosférica (mmHg)	722
Temperatura do Ambiente (°C)	25
Temperatura do Ar de Secagem (°C)	50, 60 e 70
Teor de Umidade do Ar de Secagem (%)	07 - 15
Umidade Inicial dos Grãos (% b.u)	26
Massa Inicial da Camada de Grão (Kg)	0,600
Velocidade do Ar de Secagem (m/s)	0,50
Tempo Total de 1 Experimento Completo (h)	23

**Fonte:** Produzida pelo autor com base nos dados de (Winik, 2018)

Mediante isso Winik (2018), conclui que, o modelo matemático de dois compartimentos que foi extremamente eficaz e preciso na descrição do comportamento de perda de umidade dos grãos de milho em camada fina. Os resultados foram mais precisos porque as condições de secagem foram mantidas estáveis pelos métodos experimentais usados.

A autora Andrade (2021), estudou a cinética da secagem de grãos de girassol em diferentes temperaturas, assim aplicando modelos matemáticos ajustando-os aos dados experimentais. As sementes de girassol (cultivar Altis 99) foram secas em estufa com circulação de ar forçado, ajustadas para operar nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi monitorado por meio de pesagens em intervalos pré-estabelecidos. Aos dados experimentais de razão de teor de água, foram ajustados dez modelos matemáticos, a partir de análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. A autora ajustou os mesmos modelos que De Carvalho Melo et al., (2016) tabela 1, apenas acrescentando o modelo de dois termos.

A significância dos parâmetros dos modelos foi avaliada pelo teste adotando o nível de 5% de significância. Foram verificados o grau de ajuste de cada modelo de acordo com as magnitudes do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE). Conclui-se que as taxas de remoção de água das sementes de girassol são diretamente proporcionais ao aumento da temperatura de secagem, sendo necessário, nessas







mostraram-se muito eficazes e precisos. Esses modelos são uma combinação de princípios físicos e ajustes empíricos, o que permite uma descrição mais detalhada e precisa do fenômeno de secagem.

A otimização da secagem pode reduzir perdas, melhorar a qualidade dos grãos e aumentar a eficiência energética, contribuindo para uma agricultura mais sustentável e econômica. No entanto, a adaptação e validação contínua destes modelos é essencial para garantir a sua aplicabilidade em diferentes condições e em diferentes culturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Érika Gonçalves et al. Ajuste de modelos matemáticos na secagem de sementes de girassol (*Helianthus annuus* L.). 2021. 30p Monografia (Curso de Bacharelado de Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano–Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2021.

ARAÚJO, Willian Dias et al. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.

BECHERT, Tobias. Secadores – análise dos processos de montagem. 2015.

BORTOLAIA, Luís Antônio. Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo. 2011.

BRITO, Brenda Tudrei de. Modelagem matemática de curvas típicas de secagem de frutas tropicais. 2022. 51 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Tecnológica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

CORRÊA, Paulo C. et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, v. 27, p. 501-510, 2007.

DE CARVALHO MELO, Pâmella et al. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 11, n. 3, p. 247-252, 2016.

DI DOMENICO, Camila Nicola Boeri; CONRAD, Taís Maiara. Simulação de processos de secagem através dos modelos matemáticos exponencial e de Page. *Vivências: Revista eletrônica de extensão da URI*, v. 11, n. 20, p. 134-146, 2015.

ELEFTERIADOU, L. Modelos matemáticos e empíricos. In: Uma introdução à teoria do fluxo de tráfego. *Springer Optimization and Its Applications*, vol. 84. Springer, Nova York, NY, 2014.

