



Modelagem da secagem de sementes de uva por meio de modelos de ordem fracionária

Modeling grape seed drying using fractional order models

Gracielly Yukari Taniguchi Watanabe¹, Ana Caroline Raimundini Aranha², Rafael Oliveira Defendi³

RESUMO

A modelagem da secagem de sementes tem adquirido crescente relevância, uma vez que permite prever a eficiência da secagem, estabelecendo o teor de umidade apropriado para o armazenamento. Esse processo não apenas minimiza as perdas, mas também otimiza o consumo de energia e tempo na produção, visando garantir a preservação de suas características físicas e nutricionais. Essas sementes, frequentemente descartadas da produção de vinhos, ganham valor por meio desse processo e, conseqüentemente, minimizam os impactos ao meio ambiente. O foco desta pesquisa foi ajustar os parâmetros que descrevem a cinética de secagem das sementes de uva utilizando um modelo de ordem fracionária, juntamente com uma análise comparativa em relação aos modelos tradicionais, como os modelos de Page e de primeira ordem. Além disso, investigou-se como esses parâmetros são afetados pela variação de temperatura, com a análise realizada nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C. A modelagem de ordem fracionária demonstrou de forma eficiente o processo de secagem das sementes de uvas, alcançando um valor de eficiência de 0,999 e ajustou-se melhor aos dados experimentais em comparação com os modelos tradicionais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem; Ordem fracionária; Secagem.

ABSTRACT

Seed drying modeling has gained increasing relevance, as it allows predicting drying efficiency, establishing the appropriate moisture content for storage. This process not only minimizes losses, but also optimizes energy and time consumption in the production, aiming to guarantee the preservation of its physical and nutritional characteristics. These seeds, often discarded from wine production, gain value through this process and, consequently, minimize impacts on the environment. The focus of this research was to adjust the parameters that describe the drying kinetics of grape seeds using a fractional order model, together with a comparative analysis in relation to traditional models, such as the Page and first order models. Furthermore, we investigated how these parameters are affected by temperature variation, with the analysis carried out at temperatures of 50°C, 60°C and 70°C. Fractional order modeling efficiently demonstrated the grape seed drying process, reaching an efficiency value of 0,999 and better fitting the experimental data compared to traditional models.

KEYWORDS: Modeling; Fractional order; Drying.

INTRODUÇÃO

A produção da indústria vinícola resulta em toneladas de bagaço de uva, composto pela casca e pelas sementes, que são frequentemente descartados sem tratamento, apresentando um elevado potencial de impacto no meio ambiente (EMBRAPA, 2018).

Nesse contexto, o aproveitamento do bagaço de uva se apresenta como uma excelente alternativa, conforme demonstrado na literatura por Silva (2019), que utiliza sementes de uva descartadas da fabricação de vinhos para produzir óleo de semente de

¹ Voluntária do programa de iniciação científica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: graciellyyukari@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6511540148042638.

² Universidade Estadual de Maringá, UEM, Maringá, Paraná, Brasil. E-mail: carolraimundini@gmail.com. ID Lattes: 4045139426578662.

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: rafaeldefendi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7640642191763213.



uva. Aproveitar o bagaço de uva é uma oportunidade de agregar valor a um subproduto que é abundante, mas pouco explorado. Além disso, o bagaço de uva é uma fonte promissora de compostos bioativos, com potencial para serem usados em diversos setores, como o de alimentos, farmacêuticos e cosméticos (SCHWARTZ et al., 2020).

Com o objetivo de manter as propriedades físicas e nutricionais do produto desejado, é essencial o uso de processos de secagem, visando reduzir a quantidade de água presente através da evaporação, até atingir um teor adequado para o armazenamento, minimizando as perdas e otimizando tanto o consumo de energia quanto o tempo de secagem (LIMA et al., 2017).

Quanto à secagem das sementes de uva, o estudo concentrou-se em empregar modelos de ordem fracionária para prever os parâmetros que caracterizam o processo de secagem. Vale ressaltar que esse modelo ainda é pouco explorado, havendo poucas pesquisas disponíveis sobre sua aplicação na secagem (MATIAS et al., 2018).

O principal objetivo desta pesquisa foi realizar o ajuste dos parâmetros da cinética de secagem de sementes de uva aos dados experimentais de teor de umidade da amostra em base seca em função do tempo, por meio da modelagem de ordem fracionária. Um objetivo secundário foi comparar com os modelos tradicionais, sendo eles, modelos de Page e de primeira ordem. Além disso, analisou-se o comportamento desses parâmetros em relação à temperatura, considerando três diferentes temperaturas de secagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados experimentais de umidade em função de tempo (min) e de equilíbrio foram obtidos por Borges et al. (2018), ao longo do processo de secagem de sementes de uvas nas temperaturas 50°C, 60°C e 70°C.

As análises foram conduzidas em duplicata utilizando uma estufa convencional (Nova Ética) com circulação de ar, nas temperaturas pré-determinadas e, 100 g de sementes de uva em cada experimento. As sementes de uva foram secas e as massas obtidas foram pesadas em uma balança semi-analítica, no intuito de determinar a quantidade de água evaporada durante o processo. O teor de umidade de equilíbrio e teor de umidade final foram determinados para cada temperatura, seguindo a metodologia semelhante à aplicada por Aranha et al. (2021).

MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos de Page, de primeira ordem e de ordem fracionária foram ajustados com base nos dados experimentais obtidos por Borges et al. (2018). Com base nos resultados destes ajustes, foi possível realizar uma comparação com o modelo de Page, que é expresso pela Eq. (1).

$$\frac{Y(t) - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} = \exp(-k t^n) \quad (1)$$

O modelo de primeira ordem, representado pela Eq. (2), foi aplicado e ajustado para cada temperatura utilizada. k é a constante cinética do modelo, $Y(t)$ é o teor de umidade da amostra em base seca, Y_{eq} ($kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$) é o teor de umidade de equilíbrio e Y_0 ($kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$) representa o teor de umidade inicial da amostra em base seca.

$$Y(t) = (Y_0 - Y_{eq}) \exp(-k t) + Y_{eq} \quad (2)$$

A partir do modelo de primeira ordem, foi desenvolvido um modelo de ordem fracionária de forma genérica, com uma ordem arbitrária (α) não inteira, de forma análoga ao estudo realizado por Matias et al. (2018) para secagem de soja. A resolução do modelo, de acordo com as considerações desses autores, é equivalente a:

$$Y(t) = (Y_0 - Y_{eq}) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-k t^\alpha)^i}{\Gamma(\alpha i + 1)} + Y_{eq} \quad (3)$$

Γ representa a função gama, \sum representa o somatório, ∞ representa o símbolo do infinito (índice final do somatório) e i representa o índice inicial do somatório.

AJUSTE DOS PARÂMETROS

Os parâmetros de cada modelo foram ajustados utilizando o método de Nelder-Mead para minimizar a função objetivo, simbolizada por ϕ ($kg_{\text{água}}^2 / kg_{\text{sólido seco}}^2$), como mostra a Eq. (4), que representa o somatório dos mínimos quadrados. N_{exp} representa o número de dados experimentais, Y_{exp} ($kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$) é o teor de umidade experimental da amostra em base seca e Y_{cal} ($kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$) é o teor de umidade calculado pelo modelo em base seca.

$$\phi = \sum_{i=1}^{N_{exp}} (Y_{exp} - Y_{cal})^2 \quad (4)$$

Para examinar a qualidade dos ajustes, foram adotados os seguintes parâmetros estatísticos, que estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos utilizados

Equação	Definição
$\chi^2 = \frac{\sum(Y_{exp} - Y_{cal})^2}{N_o - N_c}$	χ^2 é o qui-quadrado reduzido
$MSE = \frac{1}{N_o} \sum (Y_{exp} - Y_{cal})^2$	MSE é o erro quadrático médio
$RMSE = \left[\frac{1}{N_o} \sum (Y_{exp} - Y_{cal})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	RMSE é a raiz do erro quadrático médio
$NRMSE = \frac{RMSE}{Y_{max} - Y_{min}}$	NRMSE é a raiz do erro quadrático médio normalizada
$EF = \frac{\sum(Y_{exp} - \bar{Y}_{exp})^2 - \sum(Y_{cal} - Y_{exp})^2}{\sum(Y_{exp} - \bar{Y}_{exp})^2}$	EF indica a eficiência do modelo

Fonte: Autoria própria (2023).

N_o é o número de observações, N_c é o número de constantes do modelo, \bar{Y}_{exp} ($kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$) é o teor de umidade médio da amostra em base seca experimental,



$Y_{\text{máx}}$ ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$) é o teor de umidade da amostra em base seca máxima e $Y_{\text{mín}}$ ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$) é o teor de umidade da amostra em base seca mínima.

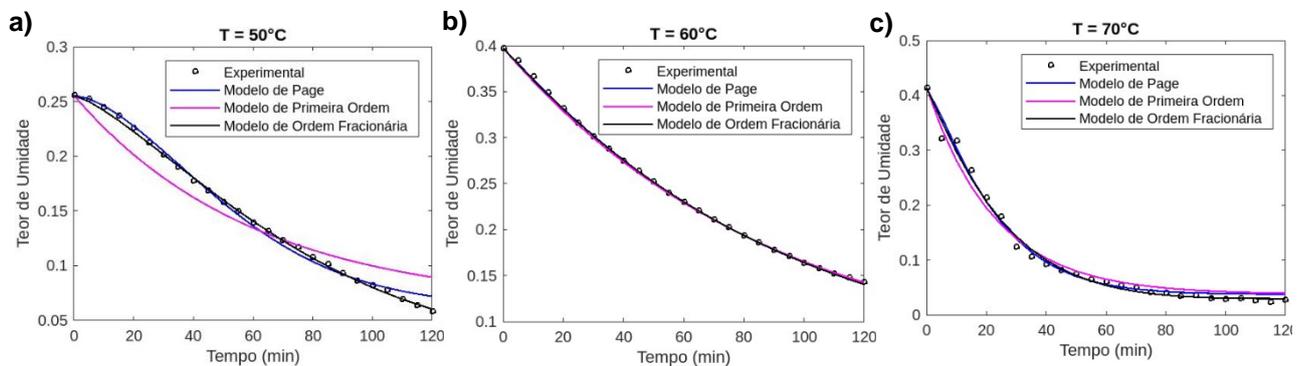
O método de mínimos quadrados visa minimizar o quadrado da diferença entre o valor do modelo e o valor experimental. Em outras palavras, os parâmetros dos modelos matemáticos devem ser estimados de forma a reduzir a distância entre o valor teórico e o valor experimental. Além disso, idealmente, a função objetivo deve atingir um valor mínimo (CARDOSO et al., 2020).

Os parâmetros estatísticos foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste. Quanto menor ou próximo de zero forem os valores do χ^2 , MSE, RMSE (representando o desvio entre o modelo e o experimental), NRMSE, melhor será o ajuste obtido. Por outro lado, o valor de EF indica a eficiência do modelo em prever o comportamento de secagem das amostras secas, sendo desejável um valor mais próximo a um para obter o melhor ajuste (MEISAMI-ASL et al., 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao discutir os métodos matemáticos utilizados neste trabalho, com o objetivo de avaliar a eficácia de ajuste das curvas que melhor representem os dados experimentais, os gráficos de secagem previstos pelos modelos a uma temperatura de 50°C, 60°C e 70°C são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento de secagem previsto pelos modelos



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 1, é possível observar o comportamento das curvas de secagem em relação ao tempo (min) para cada modelo matemático estudado, tendo como base o teor de umidade da amostra em base seca. As curvas ajustadas pelo modelo de ordem fracionária (a), (b) e (c) demonstraram uma melhor precisão de ajuste aos pontos experimentais, em comparação aos modelos de Page e de primeira ordem. Além disso, no gráfico (c) observa-se o decaimento das curvas, atingindo uma estabilidade no intervalo entre os 60 e 120 minutos, devido à influência da temperatura mais elevada, em comparação as temperaturas de 50°C e 60°C.



Tabela 2 – Média dos parâmetros estatísticos ajustados

Modelos		Page	Primeira Ordem	Ordem Fracionária
Parâmetros	χ^2	1,38E-05	1,92E-04	3,83E-06
	MSE	1,27E-05	1,85E-04	3,53E-06
	RMSE	3,28E-03	1,29E-02	1,88E-03
	NRMSE	1,57E-02	3,91E-02	8,62E-03
	EF	0,997	0,977	0,999

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados da média dos parâmetros estatísticos, conforme apresentados na Tabela 2, destacam-se ao exibir valor de eficiência (EF) de 0,999 que se aproxima de 1, reforçando a afirmação anterior acerca do melhor desempenho do ajuste realizado pelo modelo de ordem fracionária.

Tabela 3 – Parâmetros ajustados pelos modelos matemáticos utilizados

Modelos		Page		Primeira Ordem	Ordem Fracionária	
Parâmetros		k	n	k	α	k
Temperaturas	50°C	0,00333	1,20607	0,00813	1,15176	0,00428
	60°C	0,00950	1,03414	0,01102	1,02220	0,00998
	70°C	0,02124	1,21263	0,04359	1,07996	0,03146

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Tabela 3, estão dispostos os valores de α para cada temperatura, permitindo uma análise comparativa. Nota-se que todos esses valores de α são maiores que 1 ($\alpha > 1$), isso significa que o processo de difusão não segue uma relação linear em relação ao tempo. Esse comportamento classifica a difusão como anômala, podendo ser definida como superdifusiva ($\alpha > 1$) ou subdifusiva ($\alpha < 1$), como relatado por Barros (2021). Além disso, quanto mais os valores de α se afastam de 1, a difusão se torna progressivamente mais anômala, ou seja, à medida que o valor de α se distancia do valor de difusão normal ($\alpha = 1$), a difusão se torna mais irregular. Além disso, ao avaliar os coeficientes de difusão obtidos pelo modelo de ordem fracionária, revela-se que, à medida que a temperatura aumenta, ocorre um aumento significativo nos valores da constante cinética de secagem (k). Neste contexto, isso indica que no processo de secagem das sementes de uva, um aumento na temperatura favorece a cinética de secagem, como pode ser observado pelo aumento nos valores de k.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o modelo de ordem fracionária pode ser utilizado de forma satisfatória para descrever o processo de secagem das sementes de uvas. Essa modelagem levou a uma aproximação aos dados experimentais, com a eficiência quase atingindo o valor máximo de 1, chegando a 0,999.

Ao avaliar os valores de α maiores que 1, obtidos pelo modelo de ordem fracionária, foi evidenciado que a difusão se comporta de maneira anômala, ou seja, esse



comportamento difusivo não segue uma relação linear com o tempo, o que resulta em uma difusão irregular durante o processo de secagem.

Além disso, ao se elevar a temperatura do ar de secagem, houve aumento dos valores da constante cinética de secagem (k), destacando assim a influência da temperatura no processo de secagem.

Portanto, neste caso, a aplicação do modelo de ordem fracionária no processo de secagem das sementes de uva se mostrou mais efetiva comparada aos modelos tradicionais, permitindo futuramente estudar outros tipos de sementes. Por meio do uso de técnicas de cálculo fracionário, esse modelo permite um entendimento maior dos fenômenos que ocorrem no processo de secagem.

REFERÊNCIAS

ARANHA, Ana Caroline et al. **Avaliação da preservação da atividade antioxidante de sementes de milho submetidas à secagem contínua e intermitente**. 2021.

Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BARROS, Luana Aparecida de. **Busca por processos subdifusivos na caminhada de insetos confinados**. 2021. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal de São João Del-Rei, Ouro Branco, 2021.

BORGES, B. L. et al. "SECAGEM INTERMITENTE DE SEMENTES DE UVA: SIMULAÇÃO E AJUSTE DE MODELOS", p. 3018-3019. In: São Paulo: Blucher, 2018.

CARDOSO, Lislaine Cristina et al. Ajuste de parâmetros em um modelo de ordem fracionária. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 7, n. 1, 2020.

EMBRAPA. Bagaço de uva: Embrapa pesquisa usos para resíduo nobre. **Diário do Comércio**, 2018.

LIMA, W. M. P. B. et al. **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: modelagem e simulação**. 2017.

MATIAS, Gustavo de Souza et al. **Modelos de ordem fracionária empregado no estudo da cinética de secagem de soja**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.

MEISAMI-ASL, E. et al. Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab). **Plant Omics**, v. 3, n. 3, p. 103-108, 2010.

SCHWARTZ, Camila Gabriel Kato et al. Compostos bioativos do bagaço de uva (*Vitis vinífera*). **CORDEIRO, CAM Tecnologia de alimentos. Guarujá: Científica**, 2020.

SILVA, Leticia Decker da. **Aproveitamento de resíduo de vitivinicultura a partir da extração e aplicação do óleo de semente de uva**. Graduação – UTFPR, Francisco Beltrão, 2019.