



## Modelagem da Secagem Contínua de Sementes de Uva utilizando Modelos de Parâmetros Distribuídos

### Modeling Continuous Drying of Grape Seeds Using Distributed Parameter Models

Carlos Eduardo da Silva Ribeiro<sup>1</sup>, Ana Caroline Raimundini Aranha<sup>2</sup>, Rafael Oliveira Defendi<sup>3</sup>

#### RESUMO

O estudo aborda a modelagem da secagem contínua de sementes de uva utilizando modelos de parâmetros distribuídos. A pesquisa visa descrever a distribuição de umidade no interior das sementes no decorrer do processo, assim como compreender as variáveis que influenciam na cinética de secagem. Foram coletados dados experimentais com diferentes temperaturas do ar de secagem, os quais possibilitaram o ajuste dos modelos matemáticos. Esse ajuste possibilitou a estimativa do perfil interno de umidade das sementes ao longo do tempo de secagem, uma abordagem essencial para compreender como ocorre a transferência de umidade das camadas internas para a superfície das sementes. Além disso, foram conduzidas análises com base nos parâmetros do modelo, como a difusividade efetiva e o coeficiente convectivo, que foram ajustados para garantir que o modelo estivesse em concordância com os dados experimentais. Portanto, este estudo demonstrou que a modelagem de parâmetros distribuídos é uma ferramenta valiosa para a compreensão e descrição do processo de secagem das sementes de uva, obtendo informações que podem ser aplicadas para aprimorar a eficiência desse processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coeficiente convectivo; difusividade; modelagem; parâmetros distribuídos; secagem contínua.

#### ABSTRACT

The study addresses the modeling of continuous drying of grape seeds using distributed parameter models. The research aims to describe the moisture distribution inside the seeds throughout the process, as well as to understand the variables that influence the drying kinetics. Experimental data were collected at different drying air temperatures, which allowed for the adjustment of mathematical models. This adjustment enabled the estimation of the internal moisture profile of the seeds over the drying time, an essential approach to understanding how moisture is transferred from the inner layers to the surface of the seeds. Furthermore, analyses were conducted based on model parameters, such as effective diffusivity and convective coefficient, which were adjusted to ensure that the model aligned with the experimental data. Therefore, this study demonstrated that distributed parameter modeling is a valuable tool for understanding and describing the grape seed drying process, providing information that can be applied to enhance the efficiency of this process.

**KEYWORDS:** Convective coefficient; diffusivity; modeling; distributed parameters; continuous drying.

## INTRODUÇÃO

Diante do cenário do agronegócio brasileiro, a vitivinicultura é considerada uma parte vital do novo mundo da produção de vinho, principalmente em países como a China e a Austrália. No Brasil, avanços tecnológicos impulsionaram a expansão e melhoraram a qualidade da produção de uvas, tornando-se um setor economicamente relevante. Além

<sup>1</sup> Voluntário do programa de iniciação científica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; carrib@alunos.utfpr.edu.br, ID Lattes: 9756528828124166.

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil; carolraimundini@gmail.com, ID Lattes: 4045139426578662.

<sup>3</sup> Docente no curso de Engenharia Química na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil, rafaeldefendi@utfpr.edu.br, ID Lattes: 7640642191763213.



disso, a vitivinicultura ganhou destaque no comércio global, devido o benefício dos componentes da uva e seus derivados, à saúde (ROCHA *et al.*, 2019). No entanto, o crescimento da produção de uvas no Brasil trouxe o desafio do gerenciamento de resíduos gerados no processo.

O descarte de resíduos agroindustriais é um problema significativo no Brasil, o qual impacta na indústria vitivinícola, em que a biomassa residual, composta principalmente por cascas e sementes de uva, se degrada rapidamente, tornando-se inutilizável e um potencial poluente (CATANEO *et al.*, 2008). As sementes de uva, consideradas como resíduos, têm valor nutricional e econômico, contendo óleo rico em tocoferol (vitamina E) e ácidos graxos insaturados (DAVIDOV-PARDO e MCCLEMENTS, 2015). No entanto, devido ao alto teor de umidade, as sementes se degradam rapidamente, o que pode ser resolvido por meio de secagem controlada (GARCIA *et al.*, 2010).

De acordo com o cenário apresentado, o processo de secagem das sementes de uva é uma forma de tratá-las, no intuito de garantir um destino de qualidade. Sendo assim, neste estudo foi utilizado o modelo de parâmetros distribuídos para a realização da modelagem do processo de secagem das sementes de uva, permitindo ajustar e avaliar parâmetros, por meio dos perfis que variam ao longo do tempo e da superfície do material.

## METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo, foram utilizados os dados obtidos por Borges *et al.* (2018). As sementes de uva foram submetidas em estufa por 24 horas a 105°C, no intuito de se obter o teor de umidade das amostras. Para a realização da secagem, as sementes de uva foram colocadas em estufa de laboratório e as temperaturas utilizadas foram 50, 60 e 70°C. Cada temperatura foi aplicada a um grupo de sementes com teor de umidade inicial, massa inicial e temperatura ambiente definidas, a fim de analisar o efeito da variação da temperatura na cinética de secagem.

O tempo total de secagem em cada teste foi de 120 minutos, período no qual as sementes de uva foram pesadas em intervalos de 5 minutos. Essa frequência permitiu acompanhar a variação da massa e, conseqüentemente, a variação da umidade das sementes ao longo do tempo, através do cálculo do teor de umidade.

Os experimentos foram realizados em duplicata para cada temperatura de secagem. No entanto, para uma análise aprofundada, as propriedades de transporte como difusividade efetiva ( $D$ ) e coeficiente convectivo ( $Kc$ ) também foram avaliadas por meio dos modelos matemáticos.

O estudo da cinética de secagem em relação ao teor de umidade inicial pode ser realizado por meio de modelos de parâmetros distribuídos, que estimam o perfil de umidade ao longo da variação do raio da semente. Neste trabalho, utilizou-se um modelo baseado na equação de difusão em coordenadas esféricas, ou, nesse caso, equação do centro da semente, na qual considera-se que a difusividade ( $D$ ) é constante e que a semente pode ser estimada como uma esfera (DEFENDI *et al.*, 2016).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left[ \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad (1)$$

Assume-se também, que a distribuição da umidade é homogênea, ou seja, o valor de umidade é o mesmo para todas as posições dentro da semente. Sendo assim, ao aplicar uma condição de contorno que assume a existência de simetria no centro, implica-se que



a variação de umidade é igual a zero nesse ponto (Equação 2). Também pode-se aplicar uma segunda condição de contorno, a qual estabelece que o fluxo difusivo é igual ao fluxo convectivo na superfície da semente durante o processo de secagem (Equação 3) (DEFENDI *et al.*, 2016).

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \forall t \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R} \cdot -\rho_{DS}D = \rho_a Kc(X_R - X_e) \quad \forall t \quad (3)$$

Na Equação 2, considera-se o coeficiente convectivo  $Kc$ , a constante  $ra$ , que é definida como a densidade do ar,  $X_R$  como o teor de umidade na superfície do grão e  $X_e$  o teor de umidade de equilíbrio. Com isso definido, para obter a solução do modelo de parâmetros distribuídos, utilizou-se uma resolução numérica, na qual os parâmetros  $D$  e  $Kc$  foram ajustados através do método de mínimos quadrados, com base nos resultados experimentais obtidos na secagem das sementes de uva nas diferentes temperaturas. A solução do modelo foi obtida de forma análoga a Defendi *et al.* (2016).

Também foram estimados parâmetros que visam analisar a discrepância entre os valores de umidade experimentalmente observados e os previstos pelo modelo. O Residual *Sum of Squares* (RSS), ou neste caso Função Objetivo (*fobj*), uma medida utilizada no ajuste de parâmetros do modelo, calculado como a soma dos quadrados das diferenças entre os valores de umidade experimental (*Mexp*). Os parâmetros do modelo foram obtidos ao se minimizar a função objetivo.

Além disso, foram utilizados parâmetros estatísticos, como o qui-quadrado reduzido ( $X^2$ ), erro quadrático médio (MSE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), eficiência do modelo (EF) e o erro quadrático médio normalizado (NRMSE). Ao realizar o ajuste dos parâmetros do modelo, busca-se minimizar o  $X^2$ , obter um valor de RMSE, MSE e NRMSE próximo de zero e um valor de EF próximo de 1. Essas equações são importantes para avaliar a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais, e, portanto, prever o comportamento de secagem das sementes de uva (DEFENDI *et al.*, 2016).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A compreensão das variáveis que ditam a cinética da secagem das sementes de uva é essencial para a otimização e o aprimoramento desse processo. Os parâmetros utilizados no modelo, revestem-se a importância de variáveis como, o fluxo de ar na superfície das sementes e resistência do meio, para compreender como a umidade é transferida e eliminada das sementes durante o procedimento de secagem (DEFENDI *et al.*, 2016).

Nesse sentido, a modelagem de parâmetros distribuídos é fundamental, pois descreve a variação do teor de umidade ao longo do raio da semente durante o tempo de secagem. Essa abordagem se revela especialmente útil ao proporcionar uma estimativa do perfil interno de umidade da semente conforme o tempo avança (DEFENDI *et al.*, 2016).

Para quantificar a taxa na qual a difusão ocorre em um meio heterogêneo, como a semente, pode-se utilizar  $D$ . Esse parâmetro reflete a capacidade da semente em permitir o movimento de moléculas de água para sua superfície, considerando a complexidade de seu interior (BERGMAN, 2019). No entanto, o  $Kc$  espelha a taxa de transferência de calor



transferido por convecção, do ar de secagem para a semente. Já as métricas estatísticas visam avaliar a qualidade do ajuste do modelo. Os resultados dos parâmetros estão organizados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Valores dos parâmetros coletados nas secagens de 50, 60 e 70°C.**

	50°C		60°C		70°C	
	Secagem 1	Secagem 2	Secagem 3	Secagem 4	Secagem 5	Secagem 6
<b>EF</b>	9,7365E-01	9,6056E-01	9,8534E-01	9,8270E-01	9,6984E-01	9,8731E-01
<b>raKc</b>	3,8503E-04	4,5796E-04	1,1633E-03	4,2587E-03	4,8702E+04	1,2281E+05
<b>fobj</b>	1,3907E-05	1,5548E-05	4,8273E-06	1,1933E-05	2,5113E-05	2,1631E-06
<b><math>\chi^2</math></b>	6,3214E-07	7,0672E-07	2,1942E-07	5,4239E-07	2,5113E-06	5,4077E-07
<b>MSE</b>	5,5628E-07	6,2191E-07	1,9309E-07	4,7731E-07	1,9318E-06	3,0901E-07
<b>RMSE</b>	7,4584E-04	7,8861E-04	4,3942E-04	6,9087E-04	1,3899E-03	5,5589E-04
<b>NRMSE</b>	3,0744E-03	3,8476E-03	1,7256E-03	2,3295E-03	3,9319E-03	1,4900E-03
<b>D</b>	1,0109E-11	6,8557E-12	9,9887E-12	9,7121E-12	2,4260E-11	4,8277E-11
<b>Kc</b>	3,0189E-04	3,5907E-04	9,1211E-04	3,3391E-03	3,8185E+04	9,6288E+04

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise dos resultados oferece uma visão abrangente das interações que ocorrem no processo. Pode-se verificar que D aumenta à medida que a temperatura aumenta, indicando que a taxa de difusão de umidade nas sementes é mais elevada em temperaturas mais altas. Esse comportamento está alinhado com os princípios fundamentais da termodinâmica, que preveem um aumento na taxa de movimento molecular em temperaturas mais elevadas (BERGMAN, 2019).

No entanto, a discrepância nos valores do Kc entre diferentes temperaturas de secagem sugere a possibilidade de que o modelo seja pouco sensível a esse parâmetro. É importante destacar que estudos anteriores, como o de Defendi *et al.* (2016), não encontraram influência significativa da velocidade do ar na curva de secagem de grãos de soja, variando de 0,6 a 2,5 m/s. Ainda, esse estudo está em consonância com pesquisas anteriores, como o trabalho de Luz *et al.* (2006), que analisou a secagem da farinha de soja com velocidades do ar de 1,1 e 2,5 m/s.

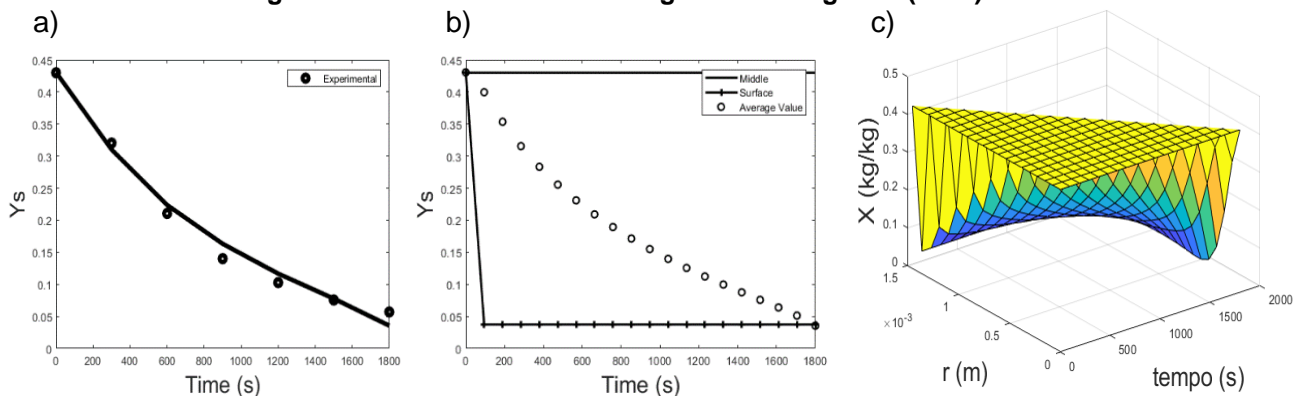
Ao examinar os valores de eficiência, pode-se afirmar que o modelo alcançou valores superiores a 96% em todos os processos de secagem. Notavelmente, a temperatura de 60°C resultou na maior eficiência média entre as temperaturas de secagem, atingindo 98,40%. Entretanto, a Secagem 6, realizada a 70°C, demonstrou a maior eficiência isolada, atingindo 98,73%.

Em relação à distribuição do teor de umidade no interior das sementes, observa-se que no início do processo o teor de umidade na superfície diminui rapidamente em comparação com o centro. Isso é resultado da exposição direta da superfície ao ar seco, que favorece a transferência de calor por convecção. À medida que o tempo de secagem avança, há uma possível estabilização na redução do teor de umidade na superfície, enquanto o interior das sementes continua a secar. Essa observação sugere que as camadas internas da semente são menos suscetíveis à transferência de água, devido à maior resistência ao processo, o que dificulta a passagem de água do interior para o ar de secagem (PERAZZINI, 2014).



Os resultados das secagens a 50°C mostraram valores mínimos de teor de umidade na superfície em torno de 10%, mas o tempo de secagem não foi suficiente para estabilizar esse indicador nessa temperatura. No entanto, para os processos a 60°C, foi possível identificar valores mínimos de teor de umidade na superfície de 7,5%, com valores médios de 17% após duas horas de secagem para ambos os processos. Já os processos a 70°C se destacaram, atingindo um equilíbrio de teor de umidade na superfície rapidamente, com valores próximos de 4%. Os valores médios ao final das secagens a 70°C se aproximaram dos valores da superfície, indicando uma maior eficiência na secagem, com relação às outras temperaturas. As soluções para a secagem a 70°C estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Resultados da modelagem da Secagem 6 (70°C)



Fonte: Autoria própria (2023).

a) Eficiência do modelo; b) Distribuição do teor de umidade; c) Perfil da distribuição do teor de umidade.

Como mencionado anteriormente, evidenciou-se que o processo que atingiu uma secagem mais eficaz do interior das sementes nas condições determinadas, foi o realizado a 70°C. A partir de determinado tempo de operação, o interior da semente tende a romper as resistências à transferência de massa de água, buscando atingir o teor de umidade de equilíbrio do processo (SOUSA, 2003).

## CONCLUSÃO

A análise dos processos de secagem utilizando a modelagem com parâmetros distribuídos desempenhou um papel fundamental, que permitiu uma representação das interações que ocorrem durante a secagem, considerando fatores como temperatura e perfil de umidade.

Com base nos valores dos parâmetros, pode-se constatar que o aumento de temperatura foi essencial para obter uma secagem mais homogênea da semente. Isso sugere que a taxa de difusão da umidade nas sementes é mais elevada em temperaturas mais altas, tornando a secagem mais eficiente. No entanto, o equilíbrio é atingido mais rapidamente, o que pode influenciar na qualidade do produto. Além disso, é importante observar que a velocidade do ar pode não ter influência significativa nas curvas de secagem, conforme evidenciado em pesquisas anteriores.

A análise das métricas de ajuste do modelo demonstrou que o modelo de parâmetros distribuídos se ajustou de forma eficiente aos dados experimentais em todas as temperaturas estudadas. Esse alto desempenho sugere que o modelo é uma opção viável para estudos nesse campo.



Através dos gráficos de distribuição de umidade, observou-se que conforme o tempo avança, a superfície das sementes perde umidade mais rapidamente do que o interior. Porém, para as secagens a 70°C, após romper as resistências da transferência de água, o teor de umidade mais próximo ao centro da semente decai dentro do tempo de secagem utilizado, sendo assim, a temperatura de secagem mais eficiente deste estudo.

## REFERÊNCIAS

BORGES, B. L., *et al.* "Secagem Intermitente de Sementes de Uva: Simulação e Ajuste de Modelo". **Blucher Chemical Engineering Proceedings**. 3018-3019. São Paulo, 2018. DOI 10.5151/cobeq2018-PT.0799

CATANEO, C. B., *et al.* Atividade antioxidante e conteúdo fenólico do resíduo agroindustrial da produção de vinho. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 93-102, jan./mar. 2008

DAVIDOV-PARDO, G.; MCCLEMENTS, D.J. Nutraceutical delivery systems: Resveratrol encapsulation in grape seed oil nanoemulsions formed by spontaneous emulsification. **Food Chemistry**, v.167, p.205-212, 2015.

DEFENDI, R. O, *et al.* Assessment of the initial moisture content on soybean drying kinetics and transport properties. **Drying Technology**, v. 34, n. 3, p.360-371, 2016. DOI:10.1080/07373937.2015.1055496.

GARCIA-PEREZ, J.V., *et al.* Extraction kinetics modeling of antioxidants from grape stalk (*Vitis vinifera* var. Bobal): influence of drying conditions. **Journal of Food Engineering**, v.101, p.49-58, 2010.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. LTC - **Livros Técnicos e Científicos**. Editora S.A. 8ª ed. p.37-62, 2019.

LUZ, G.R., *et al.* Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto. **Acta Scientiarum Technology**. 173–180, 2006.

MENEZES, M. L. Estudo dos processos de secagem e extração para produção de óleo bruto de semente de uva. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. **Dissertação de Doutorado**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

PERAZZINI, H. Secagem de Sólidos Porosos Granulares. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. **Dissertação de Doutorado**. Universidade Federal de São Carlos, 2014.

ROCHA, A, M. *et al.* "Grapes: The forms of use, consumption and biological activities – a review". **Revisão Bibliográfica**. Francisco Beltrão, 2019.

SOUSA, L. H. C. D. Estudo da secagem de materiais têxteis. Departamento de Engenharia Química. **Dissertação de Doutorado**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.