

## Modelos não lineares aplicados em curva de desidratação de flores comestíveis

Gilberto R. Liska<sup>†1</sup>, Alessia Z. Volponi<sup>2</sup>, Jessica P. A. C. Fonseca<sup>3</sup>, Lucas S. Bastos<sup>4</sup>, Angelita M. Leitão<sup>5</sup>, Josiane Rodrigues<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Professor Adjunto na Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural (DTAiSeR), campus Araras – SP.

<sup>2</sup> Discente do bacharelado em Biotecnologia, Universidade Federal de São Carlos, campus Araras – SP.

<sup>3</sup> Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, Brasil.

<sup>4</sup> Mestrando em Fitopatologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil.

<sup>5</sup> Professora adjunta na Universidade Federal do Pampa, campus Itaqui - RS, Brasil.

<sup>6</sup> Professora Adjunta na Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural (DTAiSeR), campus Araras – SP.

**Resumo:** Um dos principais problemas no consumo de flores comestíveis é o fato de que elas possuem alta perecibilidade pós-colheita, o que dificulta a sua comercialização e consumo. Por isso, é importante aplicar métodos de conservação para evitar perdas, e um desses métodos é a desidratação. O objetivo desse trabalho é utilizar modelos matemáticos de regressão de modo a descrever o comportamento da flor *Viola × wittrockiana* durante a sua secagem. Dez modelos de regressão não-linear foram ajustados ao conjunto de dados de secagem obtido através de experimentação em uma temperatura de 30°C. Concluiu-se que o modelo que melhor se ajustou foi o de Midilli et al., e que, com o auxílio dele, pode-se prever a perda de massa da flor durante sua desidratação.

**Palavras-chave:** Regressão não-linear; secagem de flores; flores comestíveis; *Viola × wittrockiana*.

**Abstract:** One of the main problems in the consumption of edible flowers is the fact that those possess high perishability post-harvest, and it difficult its commercialization and consumption. For this reason, it is important to apply conservation methods to avoid losses, and one of these methods is the dehydration. This work aims to use mathematical regression models to describe the behavior of the flower *Viola × wittrockiana* during its drying period. Ten non-linear regression models were adjusted to the data set, which was obtained by experimentation in a 30°C temperature. The study concluded that the model that was the foremost adjusted was the Midilli et al., and that, with the assistance of this model, it is possible to predict the weight loss of the flower during its dehydration.

**Keywords:** Non-linear regression; flower drying; edible flowers; *Viola × wittrockiana*.

### Introdução

Segundo o Instituto Brasileiro de Floricultura (IMBRAFLOR) o Brasil encontra-se entre os 15 maiores produtores de flores no mundo, apresentando um faturamento de 6,7 bilhões com uma taxa de crescimento de 8%, sendo esta atividade importante para o agronegócio (DUVAL, 2014). Algumas espécies de flores são utilizadas na alimentação humana a centenas de anos, e entre elas o *Borago officinalis* L.; *Calendula officinalis* L.; *Perlagonium hortorum* L.; *Tropaeolum majus* L.; *Viola × wittrockiana* Gans, *Dianthus chinensis* L., entre outras. O consumo de flores vem tendo um considerável aumento em virtude de as mesmas conterem vitaminas, minerais, flavonoides, antocianinas e carotenoides (LARA-CORTÉS et al., 2014; VIEIRA, 2013), sendo que alguns desses compostos possuem ações terapêuticas, podendo ser classificados como alimentos funcionais, em virtude de estarem relacionados com a prevenção de doenças degenerativas crônicas, como câncer, diabetes, doenças cardiovasculares, entre outras (LARA-CORTÉS et al., 2014; ZULUETA; ESTEVE; FRÍGOLA, 2009).

---

<sup>†</sup> Autor correspondente: [gilbertoliska@ufscar.br](mailto:gilbertoliska@ufscar.br).

As flores apresentam alta perecibilidade pós-colheita, por isso é importante a aplicação de métodos de conservação que aumentem a vida de prateleira (SOUZA; FERREIRA; VIEIRA, 2008). Um dos métodos bastante aplicado em alimentos é a desidratação, pois é de fácil aplicação quando comparado a outros métodos (CARVALHO, 2018). A desidratação é definida como a retirada de água pela aplicação de calor sob condições controladas de temperatura, umidade e corrente de ar (FELLOWS, 2018). Além de conservar o alimento, também traz estabilidade para compostos aromáticos a temperatura ambiente por um período maior, evita que haja degradação enzimática e oxidativa, proporciona uma redução de massa (g) e economia de energia, pois o alimento não necessita ser mantido sob refrigeração e permite que o produto esteja disponível para consumo em todas as épocas do ano (PARK; YADO; BROD, 2001). Para cumprir com esses objetivos o processo de desidratação deve ser adequado para cada produto.

Dessa forma, é imprescindível que se obtenha informações sobre o comportamento da *Viola × wittrockiana* durante esse processo. Essas informações podem ser obtidas através de simulação do processo de desidratação, utilizando modelos matemáticos e estatísticos que possam descrever o comportamento durante a perda de massa (GASPARIN; CHRIST; COELHO, 2017). Esses modelos baseiam-se na Lei de Newton para resfriamento, os quais se aplicam à transferência de massa. Esta lei é aplicada quando há o pressuposto de que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas a superfície do produto (PARK; YADO; BROD, 2001).

Dado o exposto, o presente estudo tem por finalidade verificar os efeitos da desidratação na perda de massa através da aplicação de modelos não lineares na descrição da curva de secagem de flores *Viola × wittrockiana*.

## Material e Métodos

As flores utilizadas foram produzidas em casa de vegetação da Universidade Federal do Pampa - Campus Itaqui. Utilizaram-se sementes de amor-perfeito gigante suíço roxo (*Viola × wittrockiana Gams*) da empresa ISLA. Foram semeadas em substrato comercial MACPLANT e recebeu solução nutritiva com macro e micronutrientes semanalmente para que não houvesse deficiência nutricional nas plantas. Receberam irrigação diária e não foram aplicados agrotóxicos durante o cultivo. As flores foram colhidas durante o período de agosto a novembro de 2017.

Foram selecionadas flores inteiras em estado morfológico perfeito, sendo essas lavadas em água corrente e sanitizadas com solução de hipoclorito de sódio a 1%, e mantidas sob congelamento (-18°C) em freezer doméstico, até a realização das análises, exceto para as análises de umidade e cinzas, que foram realizadas logo após a colheita, para que não houvesse possíveis interferências devido ao congelamento. Para o processo de desidratação foram utilizadas flores *in natura* no final da colheita, sem passar pelo processo de congelamento. As flores de *Viola × wittrockiana* foram secas em estufa com circulação de ar Marca SOLAB, modelo SL 102/480, à temperatura de 30°C, pesadas a cada 15 minutos até peso constante por aproximadamente 3 horas, para posterior aplicação dos dados nos modelos matemáticos. Para o ajuste dos modelos, foram considerados os modelos de regressão não-lineares da Tabela 1.

As estimativas dos parâmetros dos modelos propostos foram obtidas por meio do método dos mínimos quadrados, e a avaliação do modelo que melhor se ajusta aos dados foi realizada através do erro médio relativo (EMR), erro médio estimado (EME) e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e ajustado ( $R_a^2$ ), cujas expressões são dadas por

$$EMR = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|PM - \widehat{PM}|}{PM} \right), \quad (11)$$

$$EME = \sqrt{\frac{\sum (PM - \widehat{PM})^2}{GLR}}, \quad (12)$$

em que GLR são os graus de liberdade do resíduo do modelo ajustado.

Tabela 1. Modelos de Regressão não-lineares para elaboração da curva de perda de massa ( $PM$ ) das flores de *Viola × wittrockiana* em relação ao tempo de desidratação ( $t$ ).

Designação do modelo	Modelo*	Equação
Page	$PM = \exp(-k \cdot t^n)$	(1)
Page Modificado	$PM = \exp[-(k \cdot t)^n]$	(2)
Henderson e Pabis	$PM = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(3)
Midilli et al.	$PM = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(4)
Wang e Sing	$PM = 1 + a \cdot t + bt^2$	(5)
Newton	$PM = \exp(-k \cdot t)$	(6)
Logarítmico	$PM = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(7)
Exponencial de dois termos	$PM = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(8)
Dois termos	$PM = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_2 \cdot t)$	(9)
Thompson	$t = a \cdot \ln(PM) + b \cdot [\ln(PM)]^2$	(10)

\*As constantes  $k$ ,  $n$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $k_0$  e  $k_1$  são parâmetros dos modelos.

Dentre os modelos propostos, para aquele que apresentar melhor qualidade de ajuste, foi fornecido um intervalo de confiança ( $IC$ ) para a perda média de massa da referida curva de desidratação. Para obtenção do intervalo de confiança, é necessário o cálculo da variância das estimativas dos parâmetros do modelo ajustado, conforme procedimento descrito por Silveira et al. (2020), dada por  $\hat{V}(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1}\hat{\sigma}^2$ , em que  $X$  é a matriz de primeiras derivadas parciais do modelo,  $\hat{\beta}$  o vetor de parâmetros do modelo, e  $\hat{\sigma}^2$  é o quadrado médio do resíduo, sendo estimado por  $\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (PM - \widehat{PM}_i)^2}{n-p}$ , com  $n$  o número de observações e  $p$  o número de parâmetros do modelo ajustado.

O erro padrão da estimativa de determinado parâmetro do modelo é dado por  $ep(\hat{\beta}_i) = \sqrt{\hat{V}(\hat{\beta}_i)}$ , sendo  $\hat{V}(\hat{\beta}_i)$  um elemento da diagonal principal da matriz de variância-covariância. Dessa forma, define-se o intervalo de 95% de confiança para o parâmetro  $\beta_i$  do modelo como

$$IC(\beta_i) = \hat{\beta}_i \pm t_{(v, 0.025)} \times ep(\hat{\beta}_i), \quad (13)$$

em que  $t_{(v, 0.025)}$  é o quantil superior da distribuição  $t$  de Student, considerando  $\alpha = 5\%$  e o grau de liberdade  $v = n - p$ . Para ajustar os modelos, bem como para obter os indicadores de qualidade do ajuste, foi utilizado o programa estatístico R (R CORE TEAM, 2021).

## Resultados e Discussão

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_a$ ), erro médio estimado ( $EME$ ) e erro médio relativo ( $EMR$ ), para cada um dos modelos matemáticos avaliados.

Dentre os 10 modelos avaliados e, de acordo com os resultados obtidos através do coeficiente de determinação ajustado, erro médio estimado e erro médio relativo, apresentados na Tabela 2, o Modelo de Midilli et al. apresentou os melhores indicadores de qualidade de ajuste. Portanto, é o modelo mais adequado para descrever o processo de perda de massa de *Viola × wittrockiana* durante os tempos de desidratação. Pode-se observar que para este modelo o coeficiente de determinação ajustado foi de 0,9832 e, conforme Silva

(2015), valores superiores a 98% significa um bom ajuste dos modelos aplicados para representação do fenômeno de desidratação. O erro médio estimado foi de 7,5281 e o erro médio relativo foi de 0,0299.

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados aos dados de desidratação de folhas de *Viola × wittrockiana*.

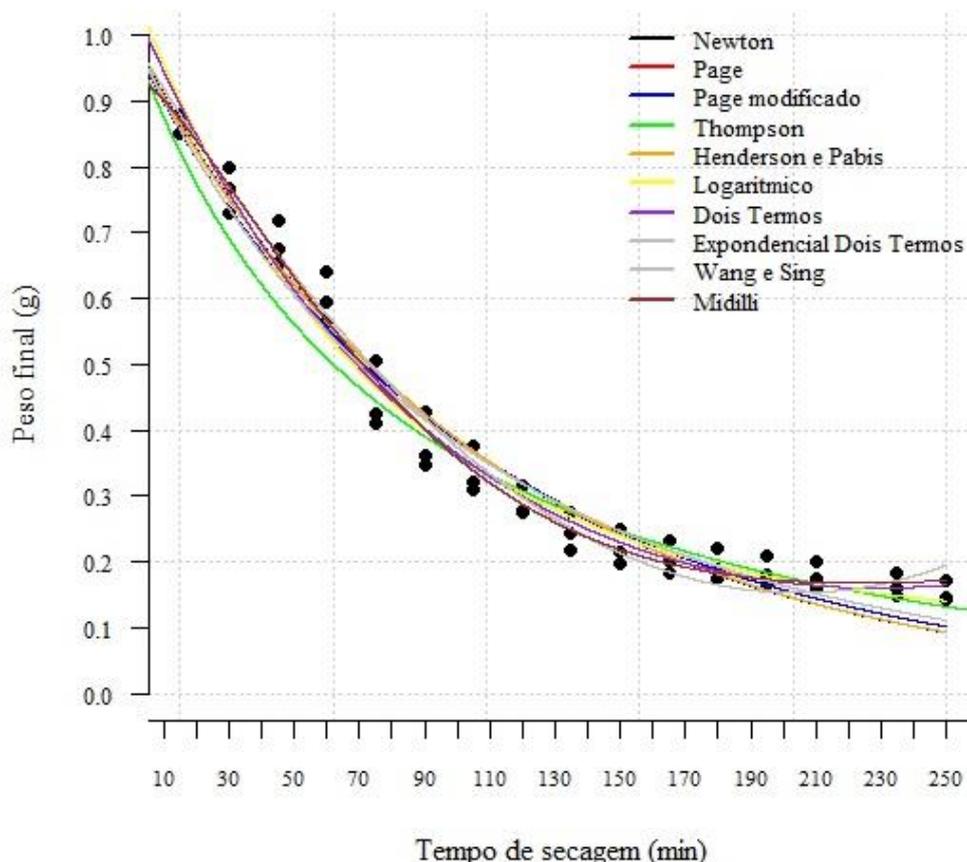
Modelo	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Valor p	$R^2$	$R^2_a$	EME	EMR
Newton	$k$	0,0095	0,0002	<0,01	0,9698	0,9698	13,59	0,0428
Page	$k$	0,0119	0,0020	<0,01	0,9668	0,9661	12,71	0,0425
	$n$	0,9523	0,0355	<0,01				
Page modificado	$k$	0,0095	0,0002	<0,01	0,9668	0,9661	12,72	0,0425
	$n$	0,9523	0,0355	<0,01				
Thompson	$a$	-71,7510	9,8230	<0,01	0,9498	0,9487	14,77	17,56
	$b$	25,5600	6,1250	<0,01				
Henderson e Pabis	$a$	0,9976	0,0231	<0,01	0,9695	0,9689	13,57	0,0433
	$k$	0,0095	0,0003	<0,01				
Logarítmico	$a$	0,9714	0,0227	<0,01	0,9781	0,9771	8,47	0,0349
	$k$	0,0132	0,0009	<0,01				
	$c$	0,1056	0,0169	<0,01				
Dois termos	$a$	1,0496	0,0218	<0,01	0,9805	0,9791	8,12	0,0332
	$k_0$	0,0110	0,0008	<0,01				
	$b$	0,0047	0,0091	0,611				
	$k_1$	-0,0122	0,0077	0,121				
Exponencial de dois termos	$a$	0,4587	0,0888	<0,01	0,9678	0,9671	11,66	0,0405
	$k$	0,0147	0,0028	<0,01				
Wang e Sing	$a$	-0,0083	0,0001	<0,01	0,9790	0,9785	10,14	0,0353
	$b$	0,0000	0,0000	<0,01				
Midilli et al.	$a$	0,9405	0,0309	<0,01	0,9843	0,9832	7,5281	0,0299
	$k$	0,0021	0,0010	0,0396				
	$b$	0,0006	0,0001	<0,01				
	$n$	1,3690	0,1000	<0,01				

Erros médios relativos abaixo de 10% indicam ajuste adequado dos valores observados em relação ao modelo ajustado (RADÚNZ et al., 2011). Outros autores também chegaram a conclusão que o modelo de Midilli et al. foi o melhor modelo para se descrever a curva de desidratação de plantas (GASPARIN; CHRIST; COELHO, 2017; MARTINAZZO et al., 2007; RADÚNZ et al., 2011; YILDIRIM, 2018).

De modo geral, os valores obtidos para os 10 modelos demonstraram que o coeficiente de determinação ajustado variou entre 0,9487 e 0,9832, o erro médio estimado variou entre 7,5281 e 14,77, e o erro médio relativo variou entre 0,0299 e 17,56 (Tabela 2).

Na Figura 1, estão apresentadas as curvas dos modelos ajustados para descrever os resultados experimentais da perda de massa durante os diferentes tempos do processo de desidratação das flores de amor-perfeito.

Figura 1. Modelos ajustados aos dados de desidratação das flores de *Viola × wittrockiana*.

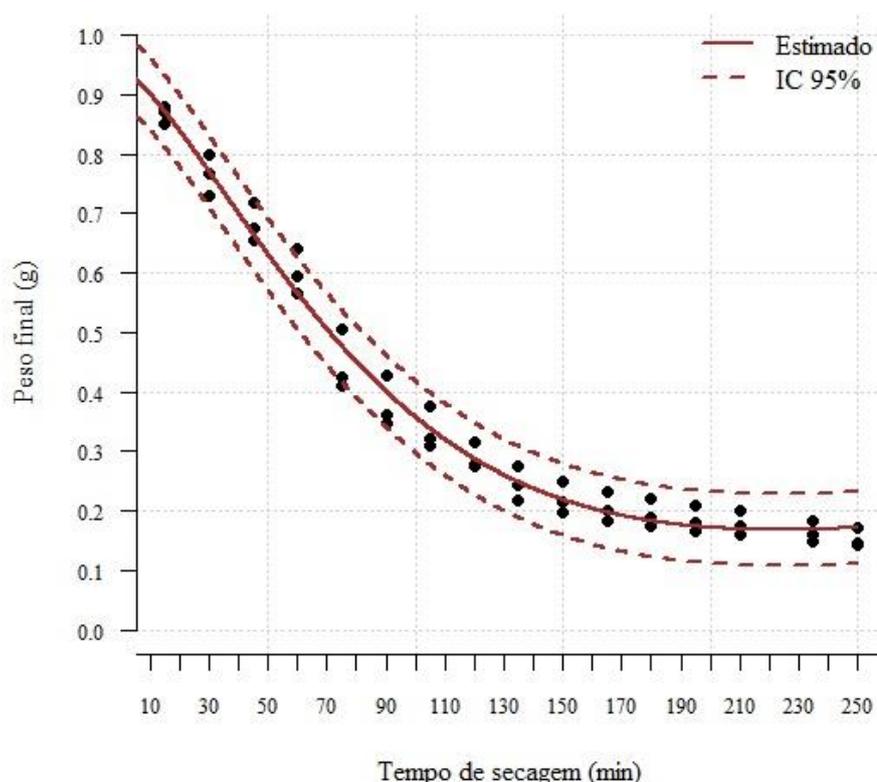


Fonte: Os autores.

Observa-se na Figura 1, que todos os modelos se ajustam aos dados obtidos durante o processo de desidratação das flores de amor-perfeito, sendo a curva ajustada por *Thompson* a que mais se afasta dos dados. Por outro lado, pode-se perceber que o modelo de *Midilli et al.* descreve adequadamente o processo de secagem de flores de amor-perfeito, e os resultados da Tabela 4 corroboram com esse fato. A Figura 2 apresenta os dados estimados pelo modelo de *Midilli et al.* para descrever os resultados experimentais da perda de massa durante os diferentes tempos de desidratação de *Viola × wittrockiana*, com as respectivas estimativas pontuais e intervalo de confiança de 95% para as estimativas das médias do peso final.

Pode-se notar que o Modelo de *Midilli et al.* também demonstrou graficamente um melhor ajuste aos dados experimentais de *Viola × wittrockiana* (Figura 2). Na Figura 2, é possível constatar que nas primeiras etapas do processo de desidratação ocorre perda de massa (água livre) mais rapidamente, e ao atingir o peso aproximado de 0,2g, a perda de massa se estabiliza. Ao se determinar um intervalo de confiança para o modelo ajustado, pode-se observar que todos os dados encontram-se entre o limite superior e inferior do intervalo de confiança calculado. Uma interpretação prática desse intervalo pode ser colocada da seguinte forma: com 95% de confiança, a perda média de massa da flor da *Viola × wittrockiana* está entre 0,15g e 0,25g, aproximadamente, considerando-se o tempo de desidratação de aproximadamente 170 minutos.

Figura 2. Modelo de Midilli et al. ajustado aos dados de desidração de partes comestíveis de *Viola × wittrockiana*, com as respectivas estimativas pontuais e intervalo de confiança de 95% de confiança para as estimativas médias do peso final das partes comestíveis.



Fonte: Os autores.

## Conclusão

Com relação à determinação de um modelo matemático, o modelo de Midilli et al. apresentou ajuste adequado aos dados experimentais, na temperatura de 30°C. Portanto, este modelo pode ser utilizado para prever a curva de perda de massa de *Viola × wittrockiana*. Nas primeiras etapas do processo de desidração (170 min), ocorre perda de massa mais rapidamente e, ao atingir o peso aproximado de 0,2g, a perda de massa se estabiliza. O intervalo de confiança de 95% para a perda média de massa da flor da *Viola × wittrockiana* determina que a perda média varia entre 0,15g e 0,25g, considerando-se o tempo de desidração de aproximadamente 170 minutos.

## Agradecimentos

Agradecimentos à CAPES pela concessão de bolsas de estudo e à UNIPAMPA, campus Itaqui, pela realização do experimento.

## Referências Bibliográficas

CARVALHO, F. P. Avaliação da qualidade de flores comestíveis frescas e liofilizadas e estudo sobre consumo de flores comestíveis em Portugal. [s.l.] Universidade do Porto, 18 dez. 2018.

- DUVAL, C. M. A produção de flores e a agricultura familiar. *Horticultura Brasileira*, v. 32, n. 2, p. 241–241, jun. 2014.
- FELLOWS, P. J. *Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática*. 4. ed. [s.l.] Artmed, 2018.
- GASPARIN, P. P.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M. Secagem de folhas *Mentha piperita* em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar. *Revista Ciencia Agronomica*, v. 48, n. 2, p. 242–250, 2017.
- LARA-CORTÉS, E. et al. Actividad antioxidante, composición nutrimental y funcional de flores comestibles de dalia. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, v. 20, n. 1, p. 101–116, 2014.
- MARTINAZZO, A. P. et al. Analysis and mathematical description of drying kinetic of lemon grass leaves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 301–306, 2007.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 21, n. 3, p. 288–292, dez. 2001.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, , 2021. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>
- RADÜNZ, L. L. et al. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. *Revista engenharia na agricultura - REVENG*, v. 19, n. 1, p. 19–27, 26 jan. 2011.
- SILVEIRA, E. C. et al. Functional response of *Euseius concordis* feeding on *Oligonychus ilicis* (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae). *Experimental and Applied Acarology*, v. 80, n. 2, p. 215–226, 1 fev. 2020.
- SOUZA, M. W. S.; FERREIRA, T. B. O.; VIEIRA, I. F. R. Composição centesimal e propriedades funcionais tecnológicas da farinha da casca do maracujá. *Alimentos e Nutrição Araraquara*, v. 19, n. 1, p. 33–36, 2008.
- VIEIRA, P. M. Avaliação da composição química, dos compostos bioativos e da atividade antioxidante em seis espécies de flores comestíveis. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, 2013.
- YILDIRIM, A. Kinetics and thermodynamic properties of parboiled burgos wheat (*Triticum durum*) in turkey during drying. *Applied Ecology and Environmental Research*, v. 16, n. 1, p. 495–510, 2018.
- ZULUETA, A.; ESTEVE, M. J.; FRÍGOLA, A. ORAC and TEAC assays comparison to measure the antioxidant capacity of food products. *Food Chemistry*, v. 114, n. 1, p. 310–316, 1 maio 2009.