

Parâmetros cinéticos da secagem de caules couve folha em forno elétrico
Kinetic parameters of the drying of cabbage stems in an electric oven
Parámetros cinéticos del secado de tallos de repollo en un horno eléctrico

Recebido: 17/09/2020 | Revisado: 24/09/2020 | Aceito: 19/10/2020 | Publicado: 21/10/2020

Victor Herbert de Alcântara Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6286-5403>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: victor_herbert@hotmail.com

Virgínia Mirtes de Alcântara Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6493-3203>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: virginia.mirtes2015@gmail.com

Cecília Elisa de Sousa Muniz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7402-9354>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ceciliamuniz.qi@gmail.com

Rebeca de Almeida Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4116-5050>

Centro Universitário Maurício de Nassau, Brasil

E-mail: rebeaalmeidasilva@gmail.com

Raphael da Silva Eduardo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5968-7578>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: raphael_leahpar17@hotmail.com

Márcia Ramos Luiz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3999-3719>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: marciarluiz@yahoo.com.br

Mércia Melo de Almeida Mota

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1336-9355>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: mercia01@gmail.com

Marcello Maia de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7889-126X>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: Marcello_maia2000@yahoo.com.br

Raphael Lucas Jacinto Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-2373>

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: raphaelqindustrial@gmail.com

Newton Carlos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9603-2503>

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: newtonquimicoindustrial@gmail.com

Resumo

O presente estudo tem como objetivo realizar a cinética de secagem dos caules de couve folha em forno elétrico e ajustar modelos matemáticos (empíricos e difusivos) aos dados experimentais. Os caules de couve folha com raio de 1,5mm foram submetidos ao processo de secagem em forno elétrico (1200W) nas temperaturas de 50, 70 e 90 °C. Aos dados experimentais obtidos modelos matemáticos empíricos (Lewis, Handerson & Pabis e Page) e difusivo (condição de contorno do primeiro tipo) foram ajustados. Houve aumento nos valores do parâmetro “a” e redução do parâmetro “b” do modelo de Page quando se teve aumento da temperatura de secagem de 50 para 90 °C. Os modelos de Lewis e Handerson & Pabis não apresentaram correlações dos seus parâmetros com a temperatura utilizada no processo. O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais com coeficiente de determinação R^2 acima de 0.99 e menor valor da função qui-quadrado para todas as temperaturas estudadas, principalmente para 70 °C. No entanto, quando analisado o tempo de secagem a temperatura de 90 °C apresentou redução 36,36% em relação a 70 °C, resultando na maior difusividade efetiva. Foi observado que as primeiras horas de secagem foram bastante eficazes na redução de grandes quantidades de água. Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se realizar um caracterização física, físico-química e tecnológica do material desidratado e avaliar a influência das temperatura do processo nesses parâmetros.

Palavras-chave: Agroindústria; Resíduos; Difusividade; Hortaliças folhosas.

Abstract

The present study aimed to perform the kinetics of drying the cabbage stems in an electric oven and adjust mathematical models (empirical and diffusive) to the experimental data. The cabbage stems with a radius of 1.5 mm were submitted to the drying process in an electric oven (1200W) at temperatures of 50, 70 and 90 °C. Empirical mathematical models (Lewis, Handerson & Pabis and Page) and diffusive (boundary condition of the first type) were adjusted to the experimental data obtained. There was an increase in the values of parameter “a” and a reduction of parameter “b” of the Page model when there was an increase in the drying temperature from 50 to 90 °C. The Lewis and Handerson & Pabis models did not show correlations of their parameters with the temperature used in the process. The Page model was the one that best fit the experimental data with a determination coefficient R^2 above 0.99 and the lowest value of the chi-square function for all temperatures studied, mainly at 70 °C. However, when the drying time was analyzed, the temperature of 90 °C showed a reduction of 36.36% in relation to 70 °C, resulting in the greatest effective diffusivity. It was observed that the first hours of drying were very effective in reducing large amounts of water. As a suggestion for future work, it is possible to carry out a physical, physical-chemical and technological characterization of the dehydrated material and to evaluate the influence of the process temperatures on these parameters.

Keywords: Agribusiness; Waste; Diffusivity; Leafy vegetables.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo realizar la cinética de secado de los tallos de repollo en un horno eléctrico y ajustar los modelos matemáticos (empíricos y difusivos) a los datos experimentales. Los tallos de repollo con un radio de 1,5 mm se sometieron al proceso de secado en un horno eléctrico (1200W) a temperaturas de 50, 70 y 90 °C. Los modelos matemáticos empíricos (Lewis, Handerson & Pabis y Page) y difusivos (condición de frontera del primer tipo) se ajustaron a los datos experimentales obtenidos. Hubo un aumento en los valores del parámetro “a” y una reducción en el parámetro “b” del modelo de Page cuando hubo un aumento en la temperatura de secado de 50 a 90 °C. Los modelos de Lewis y Handerson & Pabis no mostraron correlaciones de sus parámetros con la temperatura utilizada en el proceso. El modelo de Page fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales con un coeficiente de determinación R^2 superior a 0,99 y el menor valor de la función chi-cuadrado para todas las temperaturas estudiadas, principalmente a 70 °C. Sin embargo, cuando se analizó el tiempo de secado, la temperatura de 90 °C mostró una reducción del 36,36% en

relación a los 70 °C, resultando en la mayor difusividad efectiva. Se observó que las primeras horas de secado fueron muy efectivas para reducir grandes cantidades de agua. Como sugerencia para trabajos futuros, es posible realizar una caracterización físico-química y tecnológica del material deshidratado y evaluar la influencia de las temperaturas del proceso sobre estos parámetros.

Palabras clave: Agronegocios; Residuos; Difusividad; Vegetales de hoja.

1. Introdução

O consumo de hortaliças é fundamental em qualquer cardápio nutricionalmente adequado, devido ao seu teor de vitaminas, sais minerais, fibras, aporte calórico baixo e por aumentar o resíduo alimentar no trato gastrointestinal (Teixeira et al., 2013). Com a mudança de hábitos alimentares em ascensão, as hortaliças passaram a ser um dos alimentos mais consumidos atualmente, assim aumentando a sua produção (Perreira et al., 2015).

A couve-folha é uma das hortaliças mais populares no centro-sul brasileiro, sendo produzida em pequenas áreas nos cinturões verdes e, também, em hortas domésticas, enriquecendo a alimentação diária da população brasileira (Marcolini et al., 2008). A couve-de-folha é uma brássica típica de outono-inverno e apresenta certa tolerância ao calor podendo ser plantada ao longo de todo o ano. A planta adulta emite numerosos rebentos laterais que podem ser utilizados na sua propagação (Filgueira, 2003). A couve folha (*Brassica oleracea* L.) é uma hortaliça muito rica em nutrientes, especialmente cálcio, ferro, vitaminas A, C, K e B5. Essa hortaliça é considerada boa fonte carotenoides apresentando, entre as hortaliças, maiores concentrações de luteína e beta caroteno, reduzindo riscos de câncer no pulmão e de doenças oftalmológicas crônicas como cataratas (Lefsrud, 2007).

Os resíduos de frutas, verduras e legumes não constituem o cardápio alimentar da maioria das populações, além de serem descartados em grandes quantidades pelas indústrias alimentícias. Pesquisas revelam que os resíduos vegetais são importantes fontes de nutrientes e poderiam ser aproveitados como uma forma econômica de solucionar o problema da fome e desnutrição das populações carentes (Santos et al., 2003). Os resíduos de alimentos minimamente processados e os resíduos de frutas e hortaliças utilizadas na indústria alimentícia são, geralmente, desprezados e poderiam ser utilizados como fonte alternativa de fibras (Pereira, et al., 2003). A obtenção destes produtos é responsável pela produção de quantidades significativas de talos de hortaliças, eliminados durante as operações de seleção e corte, e que constituem grande desperdício para a indústria (Mauro et al., 2010).

Esses talos, especificamente, possuem teores apreciáveis de fibra alimentar, e seu aproveitamento na elaboração de alimentos processados contribuirá para o aumento dos teores de fibra insolúvel na dieta, além de reduzir o acúmulo crescente dos desperdícios industriais (Sánchez & Pérez, 2001; Penna & Villaroel, 2001). Nesse contexto, visando as reduções dos subprodutos gerados pela agroindústria, o presente estudo tem como objetivo realizar a cinética de secagem dos caules de couve folha em forno elétrico e ajustar modelos matemáticos (empíricos e difusivos) aos dados experimentais.

2. Metodologia

As folhas de couve (*Brassica oleracea*) (Figura 1) foram adquiridas no comércio local da cidade de Campina Grande, Paraíba, Brasil. Em seguida foram transportados para o laboratório sendo realizadas as etapas de limpeza, higienização, sanitização em solução de hipoclorito de sódio (200 mg L^{-1} de cloro livre) por 15 min e lavagem em água corrente. Os caules foram removidos com um auxílio de uma faca doméstica com um diâmetro de ($R=1,5\text{mm}$) medido por meio de um paquímetro digital.

Figura 1 – Folhas e talos de couve antes do processo de secagem em forno elétrico.



Fonte: Própria (2020).

Os caules de couve folha ($R=1,5 \text{ mm}$) foram distribuídas uniformemente em bandejas e o teor de água inicial e de equilíbrio em cada temperatura foi determinado conforme metodologia do Instituto Adolfo Lutz (Brasil, 2008). Os dados experimentais foram expressos em termos de razão de teor de água (X^*), como descrito na Equação (1). A cinética foi realizada nas temperaturas de 50, 70 e 90 °C em um forno elétrico com potência de 1200 W.

$$X^*(t) = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (1)$$

Onde: X^* : razão de teor de água (adimensional); X_{eq} : teor de água de equilíbrio (base seca); $X(t)$: teor de água (base seca); X_i : teor de água inicial (base seca).

Três funções empíricas $f(t,a,b)$, Lewis (Equação 2), Handerson & Pabis (Equação 3) e Page (Equação 4) foram ajustadas aos conjuntos de dados experimentais, usando regressão não linear através do Software de Ajuste de Curvas LAB Fit (Silva & Silva, 2008). Os resultados dos modelos empíricos foram avaliados através dos indicadores estatísticos qui-quadrado (χ^2) (Equação 5) e coeficiente de determinação (R^2).

$$X^* = e^{-at} \quad (2)$$

$$X^* = ae^{-bt} \quad (3)$$

$$X^* = e^{-at^b} \quad (4)$$

Onde: X^* é a razão de umidade adimensional; a e b são os parâmetros dos modelos; t é o tempo de secagem

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{exp,i}^* - X_{pre,i}^*)^2}{N - n} \quad (5)$$

onde: χ^2 é a função qui-quadrado; $X_{exp,i}^*$ é a razão de umidade experimental; $X_{pre,i}^*$ é a razão de umidade prevista pelo modelo; N é o número de dados experimentais; e n é o número de coeficientes e constantes do modelo.

A difusividade efetiva (D_{eff}) do processo de secagem foi calculado através de uma solução analítica da equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo e geometria de cilindro infinito (Equação 6) segundo metodologia proposta por Luivok (1968).

$$X^* = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{200} \frac{4}{\mu_n^2} e^{(-\mu_n^2 \frac{Deff}{R^2} t)} \quad (5)$$

Onde: X^* é o teor de umidade no instante t ; X_{eq}^* é o teor de umidade para $t \rightarrow \infty$; X_i^* é o teor de umidade para $t=0$; R é o raio de cilindro; $Deff$ é a difusividade; t é o tempo de secagem; $J_0(\mu) = 0$.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 1, pode-se observar os valores obtidos para cada parâmetro dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais, assim como os parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e a função qui-quadrado (χ^2).

Tabela 1 - Parâmetros obtidos pelos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais da cinética de secagem dos caules de couve folha em forno elétrico.

Modelo	T (°C)	Parâmetros		R^2	χ^2
		a	b		
Lewis	50	$(0,203 \pm 0,007) \times 10^{-2}$	-	0,985	0,028
	70	$(0,438 \pm 0,016) \times 10^{-2}$	-	0,992	0,017
	90	$(0,107 \pm 0,038) \times 10^{-2}$	-	0,989	0,014
Handerson & Pabis	50	$1,020 \pm 0,012$	$(0,211 \pm 0,080) \times 10^{-2}$	0,983	0,024
	70	$1,033 \pm 0,011$	$(0,468 \pm 0,017) \times 10^{-2}$	0,990	0,011
	90	$0,979 \pm 0,017$	$(0,102 \pm 0,005) \times 10^{-1}$	0,987	0,051
Page	50	$(0,435 \pm 0,011) \times 10^{-3}$	$1,262 \pm 0,043$	0,994	0,008
	70	$(0,142 \pm 0,017) \times 10^{-2}$	$1,223 \pm 0,024$	0,998	0,002
	90	$(0,181 \pm 0,024) \times 10^{-1}$	$0,874 \pm 0,031$	0,993	0,006

Fonte: Própria (2020).

Verificou-se através da Tabela 1, aumento nos valores do parâmetro “a” e redução do parâmetro “b” do modelo de Page quando se teve aumento da temperatura de secagem de 50 para 90 °C. Os modelos de Lewis e Handerson & Pabis não apresentaram correlações dos seus parâmetros com a temperatura utilizada no processo.

Dentre os modelos avaliados, a função qui-quadrado (χ^2) variou entre 0,011 a 0,051 para os outros modelos analisados, este valor oscilou entre 0,002 e 0,008 para o modelo de Page, nas diferentes condições experimentais. Com relação aos valores do coeficiente de determinação (R^2), todos os modelos ajustados apresentaram valores superiores a 98%, no entanto, apenas o modelo de Page apresentou valores superiores a 99% para as três temperaturas estudadas. Dessa forma segundo Santos et al. (2020), esse comportamento de baixos valores da função qui-quadrado e altos valores do coeficiente de determinação indicam ajuste satisfatório do modelo matemático aos dados experimentais.

Souza et al. (2011) ao realizarem a cinética de secagem de nabo forrageira nas temperaturas variando de 30 a 70 °C, observaram que o modelo de Midili foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Garcia et al. (2019) ao aplicarem o processo de secagem em folhas de capim limão nas temperaturas de 35, 45, 55 e 65 °C, concluíram que o modelo de Midili foi o que melhor representou o processo. Na Tabela 2, pode-se observar o tempo do processo de secagem dos caules de couve folha para cada temperatura empregada.

Tabela 2 – Tempo do processo de secagem dos caules de couve folha em forno elétrico.

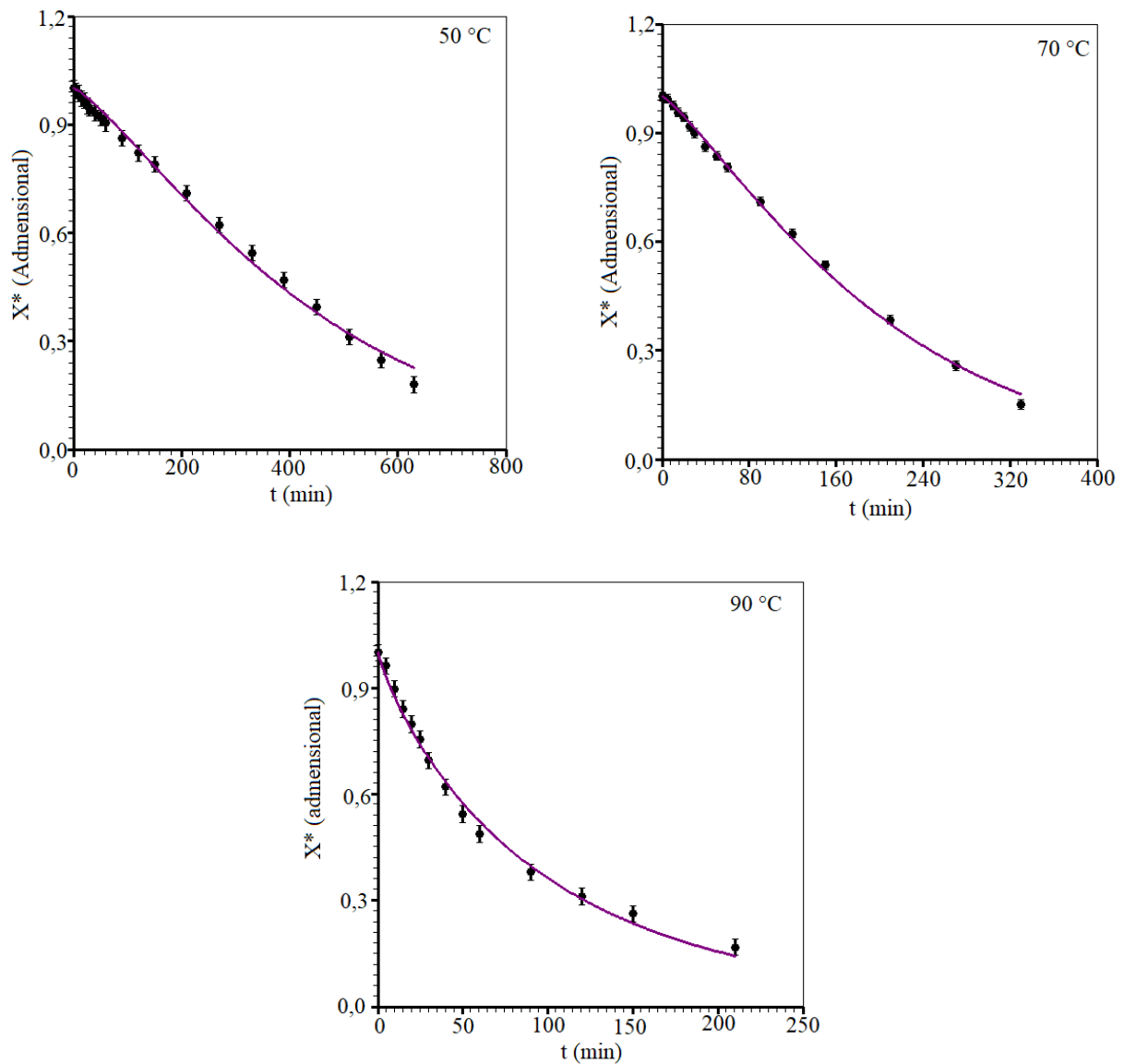
Temperatura (°C)	Tempo de secagem (min)
50	630
70	330
90	210

Fonte: Própria (2020).

É notório uma redução no tempo de processo de 630 para 210 min quando se teve aumento da temperatura de 50 para 90 °C que corresponde a 66,67% do tempo. Segundo Oliveira et al. (2019) esse conhecimento auxilia no desenvolvimento e melhoria de secadores, possibilitando o cálculo da energia requerida durante a secagem.

Na Figura 2, estão apresentadas as curvas da cinética de secagem (razão de umidade x tempo de secagem) dos caules de couve folha simuladas pelo modelo empírico de Page para as três temperaturas aplicadas.

Figura 2 – Cinética de secagem simulada usando o modelo empírico de Page nas temperaturas de 50, 70 e 90 °C.



Fonte: Própria (2020).

Pode-se observar pela Figura 2, que as primeiras horas de secagem foram bastante eficazes na redução de grandes quantidades de água, então verifica-se que a curva atinge o nível mais estável de secagem onde a variação da água retirada é mínima. Segundo Almeida et al. (2020) as curvas da cinética permitem visualizar que o acréscimo da temperatura

favorece a transferência de massa, diminuindo a umidade de equilíbrio dinâmico e o tempo de secagem, acarretando em uma maior taxa de remoção de água, independentemente do tipo do material utilizado.

Na Tabela 3, estão apresentados os resultados obtidos pela solução analítica do modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo e considerando a geometria de um cilindro infinito.

Tabela 3 – Resultados obtidos por otimização utilizando solução analítica.

T (°C)	D_{eff} (m ² min ⁻¹)	R ²	χ^2
50	3,720 x 10 ⁻¹⁰	0,983	0,024
70	7,624 x 10 ⁻¹⁰	0,978	0,097
90	2,107 x 10 ⁻⁹	0,994	0,006

Fonte: Própria (2020).

O ajuste deste modelo apresentou coeficientes de determinação (R²) variando de 97 a 99% e valores da função qui-quadrado (χ^2) variando de 0,006 a 0,097. Os valores da difusividade efetiva aumentaram de 3,720 x 10⁻¹⁰ para 2,107 x 10⁻⁹ m² min⁻¹ conforme se teve aumento da temperatura de 50 para 90 °C. Almeida et al. (2020) em seus estudos com sementes de melão, também consideraram a geometria de um cilindro infinito e observaram aumento nos valores da difusividade quando se teve aumento da temperatura de secagem.

4. Considerações Finais

O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais com coeficiente de determinação R² acima de 0.99 e menor valor da função qui-quadrado para todas as temperaturas estudadas, principalmente para 70°C. No entanto, quando analisado o tempo de secagem a temperatura de 90 °C apresentou redução 36,36% em relação a 70 °C, resultando na maior difusividade efetiva. Foi observado que as primeiras horas de secagem foram bastante eficazes na redução de grandes quantidades de água. Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se realizar um caracterização física, físico-química e tecnológica do material desidratado e avaliar a influência das temperaturas do processo nesses parâmetros.

Referências

Almeida, R. L. J., Santos, N. C., dos Santos Pereira, T., de Alcântara Silva, V. M., de Alcântara Ribeiro, V. H., da Silva, L. R. I., ... & da Silva Eduardo, R. (2020). Cinética de secagem de sementes de melão descrita por um modelo de difusão. *Research, Society and Development*, 9(5), e32953146.

Brasil - Instituto Adolfo Lutz. (2008). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. (4a ed.), Digital, São Paulo, 1020p.

Garcia, J. N., Rocha, R. P., Goneli, A. L. D., de Souza Smaniotto, T. A., & Tieppo, R. C. (2019). Cinética de secagem de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf). *Global Science And Technology*, 12(2).

Filgueira, F. A. R. (2000). *Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças* (No. 635). Universidade Federal de Viçosa.

Lefsrud, M., Kopsell, D., Wenzel, A., & Sheehan, J. (2007). Changes in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) carotenoid and chlorophyll pigment concentrations during leaf ontogeny. *Scientia Horticulturae*, 112(2), 136-141.

Marcolini, M. W., Cecílio Filho, A. B., & Barbosa, J. C. (2008). Equações de regressão para a estimativa da área foliar de couve-folha. *Científica*, 33(2), 192-198.

Mauro, A. K., Silva, V. L. M. D., & Freitas, M. C. J. (2010). Physical, chemical, and sensorial characterization of cookies made with kale stalk flour (KSF) and spinach stalk flour (SSF) rich in nourishing fiber. *Food Science and Technology*, 30(3), 719-728.

Oliveira, G. H., Corrêa, P. C., Oliveira, A. P., & Botelho, S. C. C. (2019). Cinética de secagem de folhas de fumo e suas propriedades termodinâmicas. *Revista Tecnologia en Marcha*, 71.

Penna, E. W., & Villaroel, M. (2001). Fibra dietética en Iberoamérica: Tecnología y Salud; Obtención, caracterización, efecto fisiológico y aplicación en alimentos. *Varela Editora e Liuraria LTDA*.

Pereira, G. I. S., Pereira, R. G. F. A., Barcelos, M. D. F. P., & Morais, A. R. D. (2003). Avaliação química da folha de cenoura visando ao seu aproveitamento na alimentação humana. *Ciência e Agrotecnologia*, 27(4), 852-857.

Sánchez, J. L. R., & Pérez, M. F. (2001). Elaboración de productos alimenticios con fibra. La experiencia en Cuba. LAJOLO, FM *Fibra Dietética en Iberoamérica: Tecnología y Salud: obtención, caracterización, efeito fisiológico y aplicación en alimentos*. São Paulo: Varela, 263-265.

Santos, M. A. T. D., Abreu, C. M. P. D., & Carvalho, V. D. D. (2003). Effect of different boiling times on contents of minerals in leaves of broccoli, cauliflower and cabbage (*Brassica oleracea* L.). *Ciencia e Agrotecnologia*, 27(3), 597-604.

Santos, N. C., da Silva, W. P., Barros, S. L., Almeida, R. L. J., de Brito Araújo, A. J., & da Silva Nascimento, A. P. (2020). Red rice (*Oryza sativa* L.) use in flour production: Convective drying and bioactive quality. *Journal of Food Process Engineering*, e13490. Doi: 10.1111/jfpe.13490

Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S. (2008). *LAB Fit Curve Fitting Software* (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) V 7.2.50 (2008), online, available from world wide web: <www.labfit.net>, date of access: 2020-Agosto-10.

Souza, K. A. D., Resende, O., Chaves, T. H., & Costa, L. M. (2011). Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). *Revista Ciência Agronômica*, 42(4), 883-892.

Teixeira, L. E. B., dos Santos, J. E. F., dos Santos Moreira, I., de Sousa, F. C., & Nunes, J. S. (2013). Qualidade microbiológica de frutas e hortaliças comercializadas na cidade de Juazeiro do Norte, CE. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(3), 6.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Victor Herbert de Alcântara Ribeiro – 10%

Virgínia Mirtes de Alcântara Silva – 10%

Cecília Elisa de Sousa Muniz – 10%

Rebeca de Almeida Silva – 10%

Raphael da Silva Eduardo – 10%

Márcia Ramos Luiz – 10%

Mércia Melo de Almeida Mota – 10%

Marcello Maia de Almeida – 10%

Raphael Lucas Jacinto Almeida – 10%

Newton Carlos Santos – 10%