

Efeito de sistemas e condições de secagem sobre o consumo específico de energia e os compostos bioativos da taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott)

Effect of drying systems and conditions on specific energy consumption and taioba (*Xanthosoma sagittifolium* schott) bioactive compounds

Efecto de los sistemas de secado y las condiciones sobre el consumo específico de energía y los compuestos bioactivos de taioba (*Xanthosoma sagittifolium* schott)

Recebido: 25/05/2021 | Revisado: 01/06/2021 | Aceito: 04/06/2021 | Publicado: 18/06/2021

Rodrigo Aparecido Jordan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-4461>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: rodrigojordan@ufgd.edu.br

Eliana Janet Sanjinez-Argandoña

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-8839>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: elianaargandona@ufgd.edu.br

Otávio Maticoli Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5534-7261>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: otaviomaticolli13@gmail.com

Wellyton Darci Quequeto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0658-2692>
Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia Goiano, Brasil
E-mail: wellyton_quequeto@hotmail.com

Valdiney Cambuy Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-0330>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: vcambuy@yahoo.com

Viviane da Silva Mendoza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4281-1325>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: vivianeemendoza@gmail.com

Grace Kelly Mizuno Flozino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8330-7133>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: gracemizuno@gmail.com

Ítalo Sabião Sanches

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3212-6199>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: italosabiao@hotmail.com

Édipo Sabião Sanches

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0783-772X>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: ediposabiao@hotmail.com

Bruno Machado Antunes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4222-0787>
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
E-mail: bruno.m.antunes@anhanguera.com

Resumo

No trabalho de pesquisa laboratorial, com secagem de taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) em diferentes temperaturas, em dois sistemas de secagem, secador convencional com aquecimento resistivo (50, 60, 70 e 80 °C) e um protótipo de controlador higroscópico baseado em tecnologia de bomba de calor (25, 30, 35 e 40 °C), foram determinados e avaliados a taxa específica de remoção de água (SMER) e a concentração dos compostos bioativos: compostos fenólicos, vitamina C e clorofila total. O secador com bomba de calor proporcionou menor degradação dos compostos bioativos, principalmente, vitamina C. No secador convencional a menor degradação de vitamina C foi de 80,6% a 60 °C, enquanto na bomba de calor, a maior degradação foi de 70,3% na temperatura de 40 °C. A SMER aumentou com a elevação da temperatura de secagem. Os valores da SMER variaram entre 3,465 e 8,551 kg de

água/kWh para bomba de calor e, entre 6,221 e 16,956 kg de água/kWh para o secador convencional. A SMER da bomba de calor a 40 °C foi maior que a SMER do secador convencional operando a 50 °C.

Palavras-chave: Bomba de calor; Secagem a baixa temperatura; *Xanthosoma sagittifolium*; Vitamina C; Taxa específica de remoção de água.

Abstract

In the laboratory research work, with drying taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) in different installations, in two drying systems, conventional dryer with resistive heating (50, 60, 70 and 80 °C) and a prototype of a hygroscopic driver based on heat pump (25, 30, 35 and 40 °C), the specific water removal rate (SMER) and the concentration of bioactive compounds: phenolic compounds, vitamin C and total chlorophyll were determined and determined. The heat pump dryer provided less degradation of the bioactive compounds, mainly vitamin C. In the conventional dryer, the lesser degradation of vitamin C was 80.6% at 60 °C, while in the heat pump, the greater degradation was 70.3% at a temperature of 40 °C. SMER increased with increasing drying temperature. SMER values vary between 3,465 and 8,551 kg of water/kWh for the heat pump and between 6,221 and 16,956 kg of water/kWh for the conventional dryer. The SMER of the heat pump at 40 °C was higher than the SMER of the conventional dryer operating at 50 °C.

Keywords: Heat pump; Low temperature drying; *Xanthosoma sagittifolium*; Vitamin C; Specific rate of water extraction.

Resumen

En el trabajo de investigación de laboratorio, con secado de taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) en diferentes temperaturas, en dos sistemas de secado, secador convencional con calentamiento resistivo (50, 60, 70 y 80 °C) y un prototipo de controlador higroscópico basado en tecnología de bomba de calor (25, 30, 35 y 40 °C), se determinaron la tasa específica de remoción del agua (SMER) y la concentración de los compuestos bioactivos: compuestos fenólicos, vitamina C y clorofila total. El secador con bomba de calor proporcionó menos degradación de compuestos bioactivos, principalmente vitamina C. En el secador convencional, la menor degradación de vitamina C fue del 80,6% a 60 °C, mientras que en la bomba de calor, la mayor degradación fue del 70,3% a 40 °C. La tasa SMER aumentó al aumentar la temperatura de secado. Los valores de SMER variaron entre 3.465 y 8.551 kg de agua/kWh para la bomba de calor y entre 6.221 y 16.956 kg de agua/kWh para el secador convencional. La tasa SMER de la bomba de calor a 40 °C fue superior a la tasa SMER del secador convencional a 50 °C.

Palabras clave: Bomba de Calor; Secado a baja temperatura; *Xanthosoma sagittifolium*; Vitamina C; Tasa específica de extracción de agua.

1. Introdução

Os constituintes voláteis aromáticos presentes em produtos como temperos, ervas medicinais, chás e cafés são muito sensíveis ao processo de secagem. O efeito da secagem sobre a composição de substâncias voláteis tem sido pesquisado, no sentido de demonstrar que as variações nas concentrações de seus constituintes durante a secagem, dependem de vários fatores, como o método de secagem, temperatura do ar empregada, características fisiológicas, além de conteúdo e características de componentes químicos presentes nas plantas submetidas à secagem (Donget et al., 2019).

De acordo com Zhang et al. (2017), a secagem pode aumentar o número de modificações físicas e químicas indesejáveis, alterando a qualidade do produto para a sua comercialização como, por exemplo, mudanças em aparência (coloração), cheiro e possíveis perdas de constituintes voláteis que poderão influenciar na sua comercialização.

Assim, sistemas de secagem que possam operar com temperaturas relativamente baixas, representam uma solução para melhorar a qualidade de produtos sensíveis à temperatura, com a possibilidade de serem mais eficientes no que diz respeito ao consumo de energia, uma vez que utilizam o potencial de secagem do ar ambiente (Ziegler et al., 2013; Taşeri et al., 2018).

Contudo, há uma dificuldade em obter baixas temperaturas de secagem em secadores convencionais, pois estes são baseados em aquecimento sensível, estando associado com a umidade relativa. Desta forma, para se obter baixa umidade relativa, tem-se que aumentar a temperatura, o que acaba sendo prejudicial para a qualidade do produto (Closas & Villanueva, 2014).

Diante disso, a inclusão da bomba de calor em um sistema de secagem proporciona baixos valores de umidade relativa sem a necessidade de elevação da temperatura (Aktaş et al., 2014). Temperaturas mais baixas proporcionam menores danos

térmicos e físicos, além de manter os princípios ativos e substâncias voláteis que podem ser degradados com a elevação da temperatura (Hossain et al., 2013).

Os sistemas que utilizam bombas de calor podem garantir a viabilidade do processo de secagem e a manutenção da qualidade do produto. A secagem por bomba de calor tem sido amplamente relatada como um processo energeticamente eficiente (Dong et al., 2017; Dong et al., 2019). Outra vantagem dos sistemas de bomba de calor é a possibilidade de automação completa dos parâmetros, melhorando o controle das condições de operação (Liu et al., 2017).

Nativa da América Tropical e Equatorial, no Brasil a taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) é tradicionalmente cultivada no interior dos estados de São Paulo e Bahia. Suas folhas contêm cálcio, fósforo, ferro, magnésio e também vitamina C (Caxito et al., 2015; Pinto et al., 2001). Araújo et al. (2019) relataram teores significativos de compostos fenólicos, vitamina C e clorofila, que devido à capacidade de captura de radicais livres podem prevenir danos celulares ou reações de oxidação, beneficiando a saúde humana por fortalecer o sistema imunológico.

A falta de informações (Kinupp & Lorenzi, 2014) corrobora a necessidade de estudos científicos para divulgar suas potencialidades e estimular o consumo. Uma limitação particularmente importante para o consumo de taioba é o curto prazo de validade devido à deterioração rápida, resultante do alto teor de água das folhas. Assim, a secagem é uma opção para estender o prazo de consumo, desde que seja realizada de forma a preservar a qualidade nutricional do produto, em termos de compostos bioativos, benéficos para a saúde humana. Por outro lado, e não menos importante, é a questão do custo da secagem, relacionada ao consumo de energia e que entra na formação do custo do produto final.

Nesse contexto, objetivou-se avaliar os efeitos da temperatura na concentração dos compostos bioativos e na taxa específica de extração de água (SMER), na secagem de taioba em secador convencional e secador com bomba de calor.

2. Metodologia

A pesquisa de laboratório foi realizada na Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, onde foram realizados os ensaios de secagem de folhas de taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott), utilizando dois tipos de secadores, um convencional, de aquecimento sensível com resistências elétricas e, outro, com bomba de calor.

As folhas de taioba foram coletadas manualmente pela manhã, entre 60 e 75 dias após o plantio, no Horto da Universidade Federal de Grande Dourados, em Dourados, Mato Grosso do Sul, MS, Brasil (22°11'43,5"S e 54°56'07,5"W, altitude 430m). A exsiccata do material está depositada no herbário da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), sob o número 6009 (Araújo et al., 2019).

Após a colheita, as folhas foram limpas para remoção de sujeira e partes danificadas., cortadas em pequenos quadrados (2 x 2 cm), com espessura média de $0,9 \pm 0,2$ mm, sendo depois submetidas aos testes de secagem. A diminuição do teor de água foi monitorada pela pesagem periódica das amostras em balança analítica com precisão de 0,0001, em intervalos de 10 min na primeira hora, 30 min por 3 horas, e a cada hora após a quinta hora até o teor de água atingir 13%.

O sistema com bomba de calor utilizado, desenvolvido e instalado no LTRE - Laboratório de Termodinâmica, Refrigeração e Energia da FCA (Faculdade de Ciências Agrárias da UFGD), consiste de um módulo de controle higroscópico (MCH) com capacidade de resfriamento nominal de 1 TR (3024 kcal h⁻¹). Esse equipamento foi projetado para trabalhar com base na condição de umidade de equilíbrio do ar. O mesmo é capaz de resfriar, secar e elevar o teor de água no produto, dependendo da necessidade. O MCH (Figura 1A) foi conectado a uma câmara de secagem com um conjunto de seis peneiras (Figura 1B) e um sistema de aquisição de dados para monitorar a umidade relativa e a temperatura dentro da câmara de secagem.

Com esse sistema, os testes de secagem foram realizados nas seguintes temperaturas: 25, 30, 35 e 40 °C. A velocidade do ar de secagem nas sub-câmaras foi de aproximadamente 1,80 m.s⁻¹ determinada por um anemômetro digital.

Figura 1 - Sistema de secagem com bomba de calor (A), câmara de secagem e peneiras (B).



Fonte: Autores (2020).

A secagem no secador convencional, elétrico, de leito fixo (Figura 2), foi conduzida no laboratório do Grupo de Estudos de Produtos e Processos Agroindustriais do Cerrado – LabGEPPAC em quatro diferentes temperaturas: 50, 60, 70, e 80°C e velocidade no ar de secagem de 0,5 m.s⁻¹. A umidade relativa do ar foi determinada com um termohigrômetro digital.

Figura 2 - Secador elétrico de leito fixo.



Fonte: Autores (2020).

Para a medição do consumo de energia elétrica durante os ensaios de secagem, foi utilizado medidor de energia elétrica polifásico, modelo Landis Gyr E650.

A taxa específica de remoção de água para os ensaios de secagem (SMER) (Strømmen et al., 2003), foi calculada através da Equação 1, onde a diferença entre a massa inicial e a massa final do produto é a massa de água removida durante o processo de secagem.

$$SMER = \frac{m_{\text{água}}}{CE} \quad (1)$$

em que,

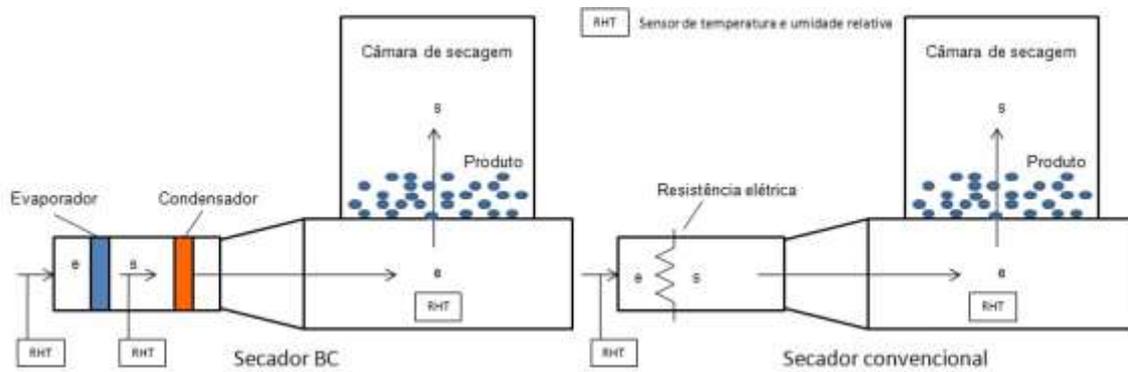
$SMER$ = taxa específica de remoção de água para os ensaios de secagem (kg de água/kWh);

$m_{\text{água}}$ = massa de água removida do produto durante o processo de secagem (kg);

CE = consumo de energia durante a secagem (kWh).

Como a capacidade dos dois sistemas de secagem era muito superior à quantidade de produto utilizada nos ensaios, para que o SMER não fosse subestimado, seguindo a metodologia proposta por Jordan et al. (2020), de acordo com a Figura 3 e as equações de 2 a 7, estimou-se a quantidade de água extraída na condição nominal dos equipamentos.

Figura 3 - Pontos de determinação dos parâmetros das equações 2, 3 e 4.



Fonte: Autores (2020).

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{Q}_0}{(h_{ar\,e\,ev} - h_{ar\,s\,ev})} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{P}{(h_{ar\,s\,r} - h_{ar\,e\,r})} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{\text{água}} = \dot{m}_{ar} \cdot (\omega_e - \omega_s) \cdot 3600 \quad (4)$$

$$m_s = \frac{\dot{m}_{\text{água}}}{TxS_{med}} \quad (5)$$

$$TxS_{med} = \frac{U_i - U_f}{t_s} \quad (6)$$

$$m_{\text{água}} = m_s (U_i - U_f) \quad (7)$$

em que,

\dot{m}_{ar} = taxa de ar seco (kg de ar seco/s);

\dot{Q}_0 = capacidade do evaporador (kJ/s);

$h_{ar\,e\,ev}$ = entalpia do ar na entrada do evaporador (kJ/kg ar seco);

$h_{ar\,s\,ev}$ = entalpia do ar na saída do evaporador (kJ/kg ar seco);

P = potência da resistência elétrica (kJ/s);

$h_{ar\,e\,r}$ = entalpia do ar na entrada da resistência elétrica (kJ/kg ar seco);

$h_{ar\,s\,r}$ = entalpia do ar na saída da resistência elétrica (kJ/kg ar seco);

$\dot{m}_{\acute{a}gua}$ = taxa de remoção de água do ar que passa pelo produto (kg de água/h);

ω_e = umidade absoluta do ar na entrada da câmara de secagem (kg de água/kg ar seco);

ω_s = umidade absoluta do ar na saída da câmara de secagem (kg de água/kg ar seco).

TxS_{med} = taxa média de secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹. h⁻¹);

U_i = teor de água no início da secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

U_f = teor de água no final da secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

t_s = tempo de secagem (h).

Para a condição de saída das câmaras de secagem, foi assumido que o ar, após passar pelo produto sofreria um processo de umidificação a temperatura constante até atingir um valor de umidade relativa correspondente a condição de umidade de equilíbrio de 13% (b.u.), ajustada de acordo com a equação de Harkins-Jura modificada (Jordan et al., 2020).

A capacidade do evaporador (Q_0) foi obtida no catálogo técnico do compressor utilizado na bomba de calor, com base nos valores de temperatura de evaporação e condensação para cada condição de secagem.

Os valores das propriedades psicrométricas entalpia e umidade absoluta do ar foram determinados através do programa computacional Grapsi 8.1.1, utilizando os valores de temperatura e umidade relativa fornecidos pelos sensores RHT (Figura 3).

Para avaliar a influência das condições de secagem sobre a qualidade do produto seco, foram analisados os seguintes compostos bioativos: conteúdo de compostos fenólicos totais, conteúdo de vitamina C (ácido ascórbico) e clorofila total.

O conteúdo de compostos fenólicos totais (CFT) foi estimado por ensaio colorimétrico seguindo os procedimentos descritos por Singleton et al. (1999), com algumas modificações. O resultado foi expresso em mg de ácido gálico equivalente por grama de amostra desidratada (mg AGE.gms⁻¹).

O ácido ascórbico foi quantificado pelo método de Tillman (método 967.21, AOAC-2000), baseado na redução de 2,6-diclorofenol-indofenol (DCFI), utilizando a solução de ácido oxálico em substituição ao solvente do ácido metafosfórico. O ácido ascórbico P.A. foi usado como padrão de referência. Os resultados foram expressos em mg de vitamina C por 100 gramas de massa seca.

A clorofila total foi determinada seguindo o método descrito por Lichtenthaler (1987). Os valores de absorvância a 647 e 663 nm foram determinados usando um espectrofotômetro UV-VIS (Biochrom, modelo Libra S60PC). Os resultados expressos em mg de clorofila por 100 g de massa seca.

Os resultados experimentais dos compostos bioativos e da atividade antioxidante foram dados pelo valor médio de três repetições de cada amostra. Os resultados foram analisados pela análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey com intervalo de confiança de 95% utilizando o software Statistica 8.0.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados dos tempos e consumo de energia elétrica dos secadores para as condições de secagem. Assim como observado em outros trabalhos (Borém et al., 2018; Santos et al., 2017; Macedo et al., 2020), verificou-se que o aumento da temperatura de secagem propiciou redução do tempo de secagem e, conseqüentemente, do consumo de energia elétrica para ambos os sistemas de secagem.

Tabela 1 - Tempo de secagem (t_s), umidade relativa (UR), potência média (P_m) e consumo de energia (CE) para os ensaios.

	Temperatura (°C)	t_s (h)	UR (%)	P_m (kW)	CE (kWh)
Secador BC	25	25,7	29,2	1,15	29,56
	30	19,2	23,4	1,18	22,66
	35	11,3	17,6	1,42	16,05
	40	5,3	13,4	1,49	7,90
Secador convencional	50	9	19,4	0,98	8,82
	60	6	16,0	0,98	5,88
	70	3	8,0	0,98	2,94
	80	3	6,0	0,98	2,94

Fonte: Autores (2020).

No caso do sistema com bomba de calor, o aumento da temperatura de secagem ocasionou aumento da potência média, devido à mudança nas condições de operação, principalmente, pelo aumento da temperatura e da pressão de condensação (Jordan et al., 2016). No caso do secador convencional, em se tratando de resistência elétrica, não houve mudança na potência média em função do aumento de temperatura, uma vez que o sistema de controle não era variável e, sim, on-off.

O tempo de operação e o consumo de energia do secador BC operando a 40 °C foram menores em comparação ao secador convencional operando a 50 °C, 41% menos no tempo secagem e 11% menos no consumo de energia. Comparado a condição de 60 °C do secador convencional, o consumo do secador BC operando a 40 °C, foi 34% maior. No entanto, o tempo foi praticamente o mesmo, ao passo que a capacidade de secagem estimada para a BC nessa condição foi de 15,22 kg de produto seco a 13% de teor de água (b.u.), contra apenas 7,89 kg do secador convencional (Tabela 2).

Tabela 2 - Capacidade estimada para os secadores BC e convencional na condição nominal de operação.

	Temperatura (°C)	U_i (%)	U_f (%)	M_i (kg)	M_f (kg)
Secador BC	25	85	13	123,73	21,33
	30	88	13	137,83	19,01
	35	86	13	124,57	20,05
	40	84	13	82,75	15,22
Secador convencional	50	86	13	71,40	11,49
	60	88	13	57,50	7,89
	70	87	13	52,08	7,18
	80	89	13	57,83	7,98

Obs.: M_i (massa inicial), M_f (massa final), U_i (teor de água, em b.u.). Fonte: Autores (2020).

Segundo Taşeri et al. (2018) na secagem de bagaço de uva a 45 °C, o emprego de um secador com bomba de calor, possibilitou reduzir o consumo de energia em 51% quando comparado ao secador elétrico convencional, operando sob a mesma condição de temperatura.

Mesmo nas temperaturas de 35 e 40 °C, a umidade relativa do ar de secagem fornecido pelo secador BC foi menor que a umidade relativa do ar de secagem fornecido pelo secador elétrico operando a 50 °C e, a 40 °C, a umidade relativa no secador BC ainda foi menor que a umidade relativa no secador convencional a 60 °C. Esse efeito na bomba de calor é causado pela diminuição da temperatura de ponto de orvalho e da pressão de vapor, devido ao resfriamento do ar no evaporador antes do aquecimento no condensador (Closas & Villanueva, 2014; Hossain et al., 2013; Aktaş et al., 2014).

A redução da umidade relativa é uma opção para evitar o uso de temperaturas elevadas na secagem (Borém et al., 2018). Diminui-se a pressão de vapor do ar ao invés de aumentar a pressão de vapor do produto cedendo calor para este (Hossain et al., 2013).

Conforme também constatado por Borém et al. (2018), a redução na temperatura de ponto de orvalho, que implica na redução da pressão de vapor e na umidade relativa do ar, promove aumento da taxa de secagem. Isso pode ser observado na Tabela 3, quando se compara a bomba de calor a 40 °C com o secador convencional a 50 °C. Mesmo operando com uma temperatura menor, a taxa de secagem de bomba de calor foi quase 1,5 vezes maior. Isto devido à umidade relativa média (Tabela 2) que foi de 13,4% para a bomba de calor e, de 19,4% para o secador convencional.

Tabela 3 - Taxa média de redução de água ($T \times S_{med}$) e taxa específica de remoção de água para os ensaios (SMER).

	Temperatura (°C)	$T \times S_{med}$ (g de água.kg de matéria seca ⁻¹ . h ⁻¹)	SMER (kg de água.kWh ⁻¹)
Secador BC	25	148,81	3,465
	30	304,48	5,245
	35	426,83	6,514
	40	868,95	8,551
Secador convencional	50	587,19	6,221
	60	1221,75	8,395
	70	1943,46	15,272
	80	2706,33	16,956

Fonte: Autores (2020).

Com relação à taxa específica de remoção de água (SMER), o aumento de temperatura de secagem propiciou o aumento para ambos os secadores. Como os secadores operaram em temperaturas diferentes, não foi possível uma comparação direta para todas as condições. O fato do secador convencional ter operado em temperaturas bem mais elevadas, o dobro dos valores empregados na bomba de calor, favoreceu a obtenção de valores mais elevado para a SMER.

Porém, quando analisamos os pontos mais próximos entre os dois secadores, 40 °C para BC e 50 °C para o secador convencional, verifica-se que a SMER do secador BC foi 37% maior, mesmo operando em uma temperatura menor. Possivelmente por influência do menor valor de umidade relativa.

Houssain et al. (2013) em secagem com bomba de calor de raízes de Valeriana (*Valeriana officinalis* L.) com espessura de 250 mm, teor de água inicial de 89% e final de 9% (b.u.), obtiveram uma SMER de 0,038 kg/kWh para a temperatura de 40 °C e um tempo de secagem de 89 horas.

Closas e Villanueva (2014) secando fatias de manga com espessura de 13 mm em secador de bomba de calor, com

teor de água inicial de 66,5% e final de 15% (b.u.), em temperatura de 50 °C, obtiveram uma SMER de 0,122 kg/kWh para um tempo de secagem de 6,25 horas.

Aktas et al. (2014) secando folhas de hortelã com bomba de calor, com teor de água inicial de 89% e final de 6,54%, em temperaturas de 35, 40 e 45 °C e tempos de secagem de 4,5 a 8,5 horas, obtiveram valores de SMER entre 0,034 e 0,044 kg/kWh.

Os valores reportados por esses autores são muito inferiores aos valores encontrados no presente trabalho. Isto está relacionado à forma utilizada para calcular a SMER, onde foram consideradas as quantidades de produto efetivamente utilizadas nos experimentos, inferiores a capacidade dos equipamentos utilizados, levando a obtenção de valores subestimados. Por este motivo, optou-se nesse trabalho, pela estima das capacidades reais dos secadores.

De acordo com Strømme et al. (2003), para secadores com bombas de calor, valores típicos de SMER são da ordem de 2 a 5 (kg de água por kWh), dependendo da temperatura de secagem.

Jordan et al. (2020), em secagem de café (natural e despulpado) com o mesmo secador utilizado no trabalho, em temperaturas entre 15 e 40 °C, obtiveram valores de SMER variando entre 0,8745 e 1,0831 kg de água/kWh, estimados para a capacidade real do secador. Considerando apenas a massa das amostras utilizadas, esses valores permaneceram entre 0,0188 e 0,1169 kg de água/kWh. Os menores valores foram obtidos para o café natural nas menores temperaturas, enquanto os maiores valores foram obtidos para o café despulpado nas maiores temperaturas, demonstrando que, além da temperatura, a SMER também depende da morfologia do produto.

A Tabela 4 apresenta os conteúdos de compostos fenólicos totais, clorofila total e vitamina C para taioba in natura e seca nas diferentes temperaturas e secadores. Todos os compostos sofreram redução com o aumento da temperatura de secagem. A maior degradação dos compostos ocorreu para amostras submetidas ao secador convencional. A degradação da vitamina C, no secador convencional operando a 80 °C foi de 90,6%.

Tabela 4 - Compostos fenólicos, vitamina C e clorofila total das folhas de taioba (*X. sagittifolium*) in natura e seca em diferentes temperaturas nos secadores BC e convencional.

	Temperatura (°C)	Compostos fenólicos (mg EAG.g _{ss} ⁻¹)	Clorofila total (mg.100g _{ss} ⁻¹)	Vitamina C (mg.100g _{ss} ⁻¹)
	<i>In natura</i>	83,20±0,82 ^a	383,22±0,01 ^a	561,60±0,73 ^a
Secador BC	25	67,17±0,31 ^b	126,54±1,34 ^b	307,98±5,43 ^b
	30	58,51±0,11 ^c	100,31±0,42 ^c	287,77±5,05 ^c
	35	54,67±0,35 ^d	100,07±1,65 ^c	235,37±3,19 ^d
	40	53,80±0,20 ^{de}	105,48±8,86 ^d	149,29±5,01 ^e
Secador convencional	50	53,25±1,6 ^{cd}	67,50±6,34 ^e	95,27±2,93 ^f
	60	51,26±0,3 ^e	38,25±1,06 ^f	108,76±4,99 ^g
	70	41,62±1,32 ^f	37,40±0,13 ^f	82,46±3,51 ^h
	80	20,32±1,6 ^g	11,82±0,44 ^g	52,77±3,97 ⁱ

Resultados expressos em base seca. A mesma letra da coluna significa diferença não significativa pelo teste de Tukey a 5% (p > 0,05). Fonte: Autores (2020).

A secagem com bomba de calor se mostrou benéfica para a conservação da Vitamina C, a degradação média no secador BC foi de 45% contra 84% do secador convencional. Closas e Villanueva (2014) em secagem de fatias de manga a

temperatura de 50 °C em bomba de calor, constataram não ter havido degradação da vitamina C, considerando assim, esse tipo de secador adequado a secagem de produtos sensíveis ao calor.

Taşeri et al. (2018) identificaram como promissor o uso de bomba de calor na secagem de bagaço de uva. Mesmo operando com temperatura igual ao do secador convencional, os compostos bioativos se conservaram mais nas amostras secas com bomba de calor.

A menor degradação dos compostos bioativos se deu para a menor taxa de secagem, no caso, o secador BC na condição de 25 °C: 19,3% para os compostos fenólicos totais, 67% para a clorofila total e 45,2% para a vitamina C. Borém et al. (2018), observaram a influência negativa do aumento da taxa de secagem sobre a qualidade sensorial do café.

No secador convencional, a degradação da vitamina C foi menor na temperatura de 60 °C em comparação com a temperatura de 50 °C. Segundo Tajudin et al. (2019), a degradação da vitamina C não se dá tão somente pela exposição a elevada temperatura, como também pelo tempo de exposição. Tendo em vista que a 50 °C o tempo de secagem foi 50% maior, isso explica esse comportamento, também observado por Norhaida et al. (2020).

Dentre os compostos bioativos, a clorofila foi a que apresentou mais sensível a temperatura, com a uma degradação de 97% para o caso da secagem a 80 °C no secador convencional. De acordo com Zhang et al. (2016) a secagem com ar quente e sob altas temperaturas causam o escurecimento dos produtos. Os principais pigmentos presentes em plantas medicinais são clorofilas e carotenoides, os quais são sensíveis às condições de secagem (Hoscher, 2019).

Os compostos fenólicos, em comparação com a clorofila e a vitamina C, sofreram menor degradação com o aumento da temperatura de secagem, sendo também beneficiados pela secagem com bomba de calor em termos de conservação. A secagem com bomba de calor a 40 °C produziu resultado semelhante ao secador convencional a 50 °C. Considerando que o tempo de secagem com a bomba de calor foi bem menor, nesse caso, o que parece ter influenciado, foi a taxa de secagem, a qual foi quase 50% maior para a bomba de calor.

Santos et al. (2014), estudando o efeito da temperatura na secagem de peras, observaram que embora as quantidades de compostos fenólicos não tenham sido muito influenciadas pela secagem, a capacidade antioxidante sofre uma diminuição muito acentuada com o aumento da temperatura de secagem.

4. Considerações Finais

A secagem em condições de baixa temperatura e baixa umidade relativa, propiciadas pela bomba de calor, possibilitou melhor conservação dos compostos bioativos presentes nas folhas de taioba.

Mesmo a baixa temperatura, tanto o aumento do tempo de secagem, quanto da taxa de secagem tem efeito negativo sobre a manutenção da concentração dos compostos bioativos.

A taxa específica de remoção de água (SMER) aumenta com a elevação da temperatura de secagem. Por outro lado, o aumento da temperatura de secagem produz efeito negativo na conservação dos compostos bioativos.

Sugere-se para trabalhos futuros avaliar a taxa específica de extração de água para os secadores operando sob as mesmas condições de temperatura. Também avaliar o efeito da temperatura sobre a capacidade antioxidante dos compostos fenólicos.

Agradecimentos

A Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelo apoio financeiro a pesquisa que originou o trabalho.

Referências

- Aktaş, M., Ceylan, İ., & Gürel, A. E. (2014). Testing of a condensation-type heat pump system for low-temperature drying applications. *International Journal of Food Engineering*, 10(3), 521-531.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. (W. Horwitz & W. L. George Eds.). Association of Official Agricultural Chemists, (17a ed.).
- Araújo, S. S., Araújo, P. S., Giunco, A. J., Silva, S. M. & Argandoña, E. J. S. (2019). Bromatology, food chemistry and antioxidant activity of *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 31(3): 188-195.
- Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. D. S. (2018). Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates. *Coffee Science*, 13(2), 159-167.
- Caxito, M. L. C., R. R. Correia, A. C. C. Gomes, G. Justo, M. G. P. Coelho, C. M. Sakuragui, R. M. Kusterand K. C. C. Sabino. (2015). *In vitro* Antileukemic activity of *Xanthosoma sagittifolium* (Taioba) leaf extract. *Evidence-based complementary and alternative medicine*. 1:1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/384267>
- Closas, A. A.; Villanueva, E. P. An experimental investigation of the fruit drying performance of a heat pump dryer. *International Conference on Agriculture, Biology and Environmental Sciences* (ICABES'14) Dec. 8-9, 2014 Bali (Indonesia).
- Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, 234, 121-130.
- Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food chemistry*, 272, 723-731.
- Hoscher, Renata Henrique. Cinética de secagem e composição química do óleo essencial de folhas de *Pereskia aculeata* Miller. 2019. 51p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.
- Hossain, M. A., Gottschalk, K., & Hassan, M. S. (2013). Mathematical model for a heat pump dryer for aromatic plant. *Procedia Engineering*, 56, 510-520.
- Jordan, R. A., Cortez, L. A., Barbin, D. F., & Lucas Junior, J. D. (2016). Heat pump for thermal power production in dairy farm. *Engenharia Agrícola*, 36(5), 779-791.
- Jordan, R. A., Cortez, L. A., Silveira Jr, V., Cavalcanti-Mata, M. E., & Oliveira, F. D. D. (2018). Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking. *Engenharia Agrícola*, 38(4), 510-517.
- Jordan, R. A., Siqueira, V. C., Quequeto, W. D., Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., Hoscher, R. H., Mabasso, G. A., ... & Freitas, R. L. (2020). Consumo específico de energia na secagem de café com sistema de aquecimento resistivo e bomba de calor. *Research, Society and Development*, 9(9), e303997297-e303997297.
- Kinupp, V. F. & Lorenzi, H., (2014). Plantas alimentícias não convencionais (PANC) no Brasil: Guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas. *Instituto Platarum de Estudos da Flora*. São Paulo, p. 118-121.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*, 148, 350-382.
- Liu, Y., Zhao, K., Jiu, M., & Zhang, Y. (2017). Design and drying technology research of heat pump Lentinula edodes drying room. *Procedia Engineering*, 205, 983-988.
- Macedo, L. L., Vimercati, W. C., da Silva Araújo, C., Saraiva, S. H., & Teixeira, L. J. Q. (2020). Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. *Journal of Food Process Engineering*, 43(9), e13451.
- Norhaida, H. A. T., Ang, W. L., Kismurtono, M., & Siti, M. T. (2020). Effect of air temperature and velocity on the drying characteristics and product quality of *Clinacanthus nutans* in heat pump dryer. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 462, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
- Pinto, N. A., Fernandes, S., & Carvalho, V. (2001). Variabilidade da composição centesimal, vitamina c, ferro e cálcio de partes da folha de taioba (*Xanthosoma sagittifolium* Schott). *Current Agricultural Science and Technology*, 7(3).
- Santos, F. S. D., de Figueirêdo, R. M., Queiroz, A. J. D. M., & Santos, D. D. C. (2017). Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed 'pitaya' peels. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(12), 872-877.
- Santos, S. C., Guiné, R. P., & Barros, A. (2014). Effect of drying temperatures on the phenolic composition and antioxidant activity of pears of Rocha variety (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 8(2), 105-112.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-178.
- Strømmen, I.; Eikevik, T.M.; Alves-Filho, O.; Syverud, K., Jonassen, O. "Low temperature Drying with Heat Pumps – New Generations of High Quality Dried products". The 2nd Nordic Drying Conference, Copenhagen Denmark.
- Tajudin, N. H. A., Tasirin, S. M., Ang, W. L., Rosli, M. I., & Lim, L. C. (2019). Comparison of drying kinetics and product quality from convective heat pump and solar drying of Roselle calyx. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 40-49.
- Taşeri, L., Aktaş, M., Şevik, S., Gülcü, M., Seçkin, G. U., & Aktekel, B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food chemistry*, 260, 152-159.

Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(6), 1239-1255.

Zhang, Z., Liu, Z., Liu, C., Li, D., Jiang, N., & Liu, C. (2016). Effects of ultrasound pretreatment on drying kinetics and quality parameters of button mushroom slices. *Drying Technology*, 34(15), 1791-1800.

Ziegler, T., Jubaer, H., & Mellmann, J. (2013). Simulation of a heat pump dryer for medicinal plants. *Chemie Ingenieur Technik*, 85(3), 353-363.