

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALICE HOBOLD SOARES

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE
SECAGEM DA FOLHA DE BATATA-DOCE (*Ipomoea batatas*)**

FRANCISCO BELTRÃO

2021

ALICE HOBOLD SOARES

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE
SECAGEM DA FOLHA DE BATATA-DOCE (*Ipomoea batatas*)**

**Experimental study and mathematical modeling of the drying process of sweet
potato leaf (*Ipomoea batatas*)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Camila Nicola Boeri Di
Domenico.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula de Oliveira
Schmitz.

FRANCISCO BELTRÃO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALICE HOBOLD SOARES

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE
SECAGEM DA FOLHA DE BATATA-DOCE (*Ipomoea batatas*)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/dezembro/2021

Camila Nicola Boeri Di Domenico
Doutora em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ana Paula de Oliveira Schmitz
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maiquiel Schmidt de Oliveira
Mestre em Engenharia Oceânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

FRANCISCO BELTRÃO

2021

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ideny e Neiva, e à minha irmã Aline, que sempre me apoiaram e incentivaram.

Ao meu namorado Diogo, pela paciência e companheirismo.

Agradeço à minha orientadora Prof.^a Dr.^a Camila Nicola Boeri Di Domenico, por toda a orientação, dedicação e pelo suporte durante toda a realização deste trabalho.

À minha coorientadora Prof.^a Dr.^a Ana Paula de Oliveira Schmitz por todas as considerações relevantes para o meu trabalho.

Ao Prof.^o Me. Maiquiel Schmidt de Oliveira por ter aceitado fazer parte da banca e pelas considerações feitas acerca do meu trabalho.

RESUMO

Dentre as Plantas Alimentícias Não Convencionais existentes, destacam-se as folhas de batata-doce (*Ipomoea batatas*). Por conter antioxidantes, vitaminas e minerais, sua utilização na alimentação humana é recomendada para trazer benefícios à saúde. Como forma de prolongar sua conservação e facilitar o armazenamento, pode ser utilizado o processo de secagem. Contudo, esse processo deve ocorrer nas condições adequadas para que o produto não sofra deterioração ou perda das propriedades nutricionais. Dessa forma, é preciso conhecer o comportamento das folhas de batata-doce durante a secagem, sendo que uma das ferramentas úteis para prever o comportamento de produtos sob esse processo, é a modelagem matemática. Assim, o objetivo do presente trabalho foi o de obter dados experimentais da secagem da folha de batata-doce sob as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, a fim de realizar a modelagem matemática dos mesmos e determinar qual modelo matemático melhor representa o processo. Além disso, também objetivou-se obter o coeficiente de difusão efetivo para cada temperatura avaliada. A partir dos resultados obtidos neste estudo, foi possível observar que o comportamento da perda de massa desse tipo de folha foi o esperado teoricamente, em que se obteve maior perda de massa no início do processo. Ademais, para as temperaturas mais altas, a secagem ocorreu de forma mais rápida. Em relação aos ajustes de modelos matemáticos, o de Wang e Singh foi o que melhor representou o processo de secagem da folha de batata-doce, com coeficiente de determinação (R^2) mais próximos à unidade e menores valores de chi-quadrado reduzido (X^2) e erro médio relativo (P). Quanto à difusividade, os valores de coeficiente de difusão efetivos encontrados foram coerentes com a literatura, variando entre $0,5 \cdot 10^{-11}$ e $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, na faixa de temperatura de 40-70°C. Nesse contexto, o presente estudo é capaz de contribuir para embasamento na viabilidade de emprego do processo de secagem das folhas de batata-doce.

Palavras-chave: *Ipomoea batatas*; secagem; umidade; modelagem matemática.

ABSTRACT

Among the existing Non-Conventional Food Plants, sweet potato leaves stand out. Because it contains antioxidants, vitamins and minerals, its use in human food is recommended to bring health benefits. As a way to prolong its conservation and facilitate storage, the drying process can be used. However, this process must take place under specific conditions so that the product is not negatively affected. Thus, it is necessary to know the behavior of sweet potato leaves during drying, and one of the useful tools to predict the behavior of products under this process is a mathematical modeling. Thus, the objective of the present work was to carry out experiments on the drying kinetics of sweetpotato leaf under temperatures of 40, 50, 60 and 70 ° C, in order to mathematically model this process to determine which mathematical model better the represents. Furthermore, it was also aimed to obtain the effective diffusion coefficient for each temperature evaluated. After carrying out the work, it was possible to observe that the behavior of the loss of mass of this type of sheet was theoretically expected, in which a greater loss of mass was obtained at the beginning of the process. Furthermore, for the higher temperatures, drying occurred more quickly. Regarding the mathematical model adjustments, Wang and Singh's was the one that best represented the sweet potato leaf drying process, with a coefficient of determination (R^2) closer to unity and lower values of reduced chi-squared (X^2) and mean relative error (P). As for diffusivity, the effective diffusion coefficient values found were consistent with the literature, ranging between $0,5 \cdot 10^{-11}$ and $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, in the temperature range of 40-70 °C.

Keywords: *Ipomoea potatoes*; drying; moisture; mathematical modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de modelagem matemática	18
Figura 2 - Exemplos de folhas de batata-doce utilizadas neste estudo	21
Figura 3 - Padronização no tamanho das folhas	22
Figura 4 – Preparação para ensaios de secagem.....	23
Figura 5 - Perda de massa de folha de batata-doce durante secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C	27
Figura 6 - Razões de umidade médias das folhas de batata-doce em diferentes temperaturas	29
Figura 7 - Ajuste do modelo de Wang e Singh para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C	31
Figura 8 - Ajuste do modelo de Lewis aos dados de secagem da folha de batata-doce	44
Figura 9 - Ajuste do modelo de Page aos dados de secagem da folha de batata-doce	44
Figura 10 - Ajuste do modelo de Newton aos dados de secagem da folha de batata-doce	45
Figura 11 - Ajuste do modelo de Page Modificado aos dados de secagem da folha de batata-doce	45
Figura 12 - Ajuste do modelo de Henderson e Pabis aos dados de secagem da folha de batata-doce	46
Figura 13 - Ajuste do modelo de Parry aos dados de secagem da folha de batata-doce	46
Figura 14 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 40°C .	47
Figura 15 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 50°C .	47
Figura 16 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 60°C .	48
Figura 17 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 70°C .	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem.....	24
Tabela 2 - Umidades inicial (U_0) e final (U_f) médias de folhas de batata-doce após secagem convectiva em quatro temperaturas.....	28
Tabela 3 - Resultados da análise estatística dos modelos de secagem ajustados para a folha de batata-doce.....	30
Tabela 4 - Parâmetros dos modelos matemáticos para as temperaturas avaliadas .	32
Tabela 5 - Coeficientes de difusão efetivos obtidos para cada temperatura avaliada	33
Tabela 6 - Dados experimentais da secagem de folha de batata-doce.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	Folha da batata-doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	13
3.1.1	Características botânicas	13
3.1.2	Características nutricionais	14
3.1.3	Consumo e benefícios.....	14
3.2	Processo de secagem	15
3.2.1	Tipos de secagem	15
3.2.2	Características da secagem convectiva	16
3.2.3	Variáveis do processo de secagem.....	16
3.3	Coeficiente de difusão efetivo	17
3.4	Modelagem matemática	18
3.4.1	Modelos matemáticos.....	18
3.4.2	Estado da arte sobre experimentos de secagem de plantas	19
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
4.1	Coleta e preparo das amostras	21
4.2	Determinação do teor de umidade inicial e final	22
4.3	Experimentos de secagem	22
4.4	Determinação e adimensionalização da umidade instantânea	23
4.5	Modelagem matemática	24
4.6	Avaliação dos modelos matemáticos	24
4.7	Determinação do coeficiente de difusão efetivo	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Avaliação da perda de massa no processo de secagem	27
5.2	Teores de umidade inicial e final	28
5.3	Adimensionalização da umidade instantânea	28
5.4	Ajuste das curvas de cinética de secagem	29
5.5	Determinação dos coeficientes de difusão efetivos	33
6	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

APÊNDICE A - Dados experimentais da secagem de folha de batata-doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	42
APÊNDICE B – Ajuste de modelos aos dados experimentais	44
APÊNDICE C – Ajuste das curvas de secagem estimadas pelo modelo Difusivo às curvas de secagem experimentais.....	47

1 INTRODUÇÃO

A modernização tecnológica na indústria alimentícia impactou a forma de alimentação da população, afetando diretamente na saúde humana e promovendo o aumento de doenças como hipertensão e diabetes (KELLEN *et al.*, 2015). Dessa forma, vem se intensificando a busca por estilos de vida saudáveis e novas formas de alimentação, levando em consideração a funcionalidade e sustentabilidade (DE JESUS *et al.*, 2020). Nesse contexto, as Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs) apresentam-se como alternativa de fonte nutricional e funcional para a ingestão humana (LIBERATO; LIMA; SILVA, 2019).

De acordo com Kelen *et al.* (2015), o termo PANC refere-se a plantas que possuem uma ou mais partes comestíveis, sendo elas espontâneas ou cultivadas, nativas ou exóticas e que não são consumidas cotidianamente pela população. Muitas dessas plantas são consideradas “daninhas” por se desenvolverem entre outros tipos de culturas e possuem pouca valorização ecológica, econômica e alimentar (MAJOLO; LIMA; SANTOS, 2014). Contudo, tais espécies podem ser relevantes como fonte de renda, suplemento nutricional e valorização de recursos naturais (TERRA; VIEIRA, 2019).

Dentre as PANCs existentes, encontram-se as folhas da batata-doce (*Ipomoea batatas*). Esse tubérculo é considerado rústico pois tem facilidade de crescimento em diversas condições ambientais, se adaptando facilmente em vários tipos de climas e solos (SENFF, 2018), além de ser mais tolerante a doenças, pragas e elevados teores de umidade, quando comparado a outras hortaliças (ISLAM, 2014).

Apesar de a parte da planta da batata-doce mais consumida ser a raiz tuberosa, as folhas também podem ser ingeridas na alimentação humana, trazendo benefícios para a saúde. Estudos comprovam que esse alimento é rico em nutrientes, vitaminas e minerais (SALAZAR, 2018), sendo indicado por Laurie, Faber e Claasen (2018) para prevenção e tratamento de doenças cardíacas coronarianas.

Uma das operações unitárias mais empregadas na preparação para o armazenamento de folhas medicinais, é a secagem (GONELI, 2014). Trata-se de um processo de desidratação, sendo amplamente utilizado para a conservação de alimentos uma vez que, na ausência de água, microrganismos decompositores não se desenvolvem. Dentre os benefícios da secagem, destacam-se a preservação de

alimentos, disponibilidade de um produto em períodos de produção inexistente, redução de custos de armazenamento e proteção contra degradação enzimática (MARTINS, 2020). Contudo, quando realizada de forma inapropriada pode conduzir a alterações indesejáveis de sabor e cor, além da perda de componentes voláteis (PARK *et al.*, 2014).

A obtenção de informações acerca do comportamento de produtos durante o processo de secagem é muito importante para o desenvolvimento de equipamentos e estudo de sistemas de desidratação. Como uma forma de simular esse processo, podem ser empregados modelos matemáticos para representar a perda de água de um determinado produto (NASCIMENTO *et al.*, 2018). Um modelo matemático pode ser definido, de acordo com Gonçalves (2010), como um conjunto de símbolos e relações que procuram traduzir um fenômeno em um problema real.

A partir da realização de ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem de determinado produto é possível, também, determinar índices relacionados aos processos de transferência de calor e massa, como o coeficiente de difusão. Esse parâmetro é importante pois permite avaliar e comparar a velocidade com que ocorre a secagem (BOTELHO *et al.*, 2015).

Para o estudo da desidratação de folhas, a realização da cinética de secagem é um método viável para analisar o comportamento da transferência de massa entre o produto e o agente de secagem. Além disso, é importante para fornecer informações para a simulação e dimensionamento de equipamentos (SILVA; SANTOS; RODOVALHO, 2016).

Nesse contexto, a partir do presente trabalho buscou-se avaliar o processo de secagem da folha de batata-doce, uma vez que essa planta ainda é pouco estudada e o seu comportamento durante esse processo é desconhecido. Para isso, modelou-se matematicamente a cinética de secagem da folha de batata-doce através de diferentes modelos matemáticos apresentados na literatura, para diferentes condições de temperaturas de secagem, nas quais os experimentos foram realizados. Além disso objetivou-se, também, determinar o coeficiente de difusão para as temperaturas avaliadas, visando obter dados que auxiliem na compreensão do processo de secagem para a PANC em estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Modelar matematicamente o processo de secagem da folha de batata doce (*Ipomoea batatas*).

2.2 Objetivos específicos

- Realizar experimentos de cinética de secagem com as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C;
- Utilizar modelos matemáticos para modelar o processo de secagem das folhas;
- Determinar o coeficiente difusivo para cada temperatura avaliada.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Folha da batata-doce (*Ipomoea batatas*)

A batata-doce (*Ipomoea batatas*) é um tubérculo que tem sua origem nas Américas Central e do Sul (RAMALHO, 2018). Trata-se de um alimento que pode ser produzido em todo o Brasil, sem exigir muito trabalho de manejo e uso de fertilizantes, apresentando-se em grande variedade de texturas, sabores e cores (JOSÉ; CARVALHO; WIEST, 2012).

Embora não seja a parte mais comumente consumida da batata-doce, a folha também apresenta características nutricionais que a torna apta para o consumo humano, sendo considerada como Planta Alimentícia Não Convencional (PANC).

As PANCs são espécies de plantas ou parte delas que podem ser consumidas, mas que não fazem parte dos hábitos alimentares da população (SARTORI *et al.*, 2020). Isso muitas vezes ocorre pelo fato de os consumidores optarem sempre pelas mesmas hortaliças e não se disponibilizarem a conhecer novas preparações de pratos (ALMEIDA *et al.*, 2014). Dessa forma, se faz necessária a divulgação dos valores alimentícios dessas plantas, pois elas favorecem a autonomia das famílias e garantem segurança alimentar e nutricional (XAVIER, 2015).

3.1.1 Características botânicas

Pode-se dividir a planta da batata-doce em três partes principais. O caule possui constituição herbácea, com hábito de crescimento prostrado, apresentando ramificações de tamanho, cor e pilosidade variáveis (EDMOND; AMMERMAN, 1971). O pecíolo é longo, de cor e pubescência semelhantes ao caule, podendo apresentar ou não pigmentação na inserção do caule. Já as folhas são simples, alternas, dispostas em espiral em torno do caule, pubescentes ou glabras e o limbo foliar e as nervuras apresentam-se em colorações e formatos bastante variados (CAMARGO, 2013). Segundo Senff (2018), a batata-doce possui duas raízes. Uma é tuberosa, responsável pelo armazenamento dos nutrientes e comestível, enquanto a outra é absorvente, cuja função é absorver água e extrair componentes nutricionais do solo.

3.1.2 Características nutricionais

A raiz tuberosa (batata) é a parte que possui maior valor comercial. Ela apresenta coloração externa variada e seu formato pode ser alongado ou arredondado, variando com o tipo de solo em que está inserida. Já a polpa pode ser encontrada nas cores branca, creme, amarela, avermelhada ou roxa. Esse alimento pode ser consumido de muitas maneiras e apresenta elevado valor nutricional, contendo amido como principal carboidrato presente na sua composição (SENFF, 2018). Além disso, trata-se de uma boa fonte de minerais, uma vez que é rica em potássio (VIZZOTTO *et al.*, 2018).

Em relação às folhas, estudos apontam que elas apresentam baixos níveis de substâncias tóxicas e uma quantidade significativa de nutrientes, vitaminas e minerais (SALAZAR, 2018). Além disso, são fontes excelentes de polifenóis que atuam como antioxidantes, sendo que a concentração desses componentes é comparável ao espinafre e brócolis (ISLAM, 2014). Ademais, essas folhas são compostas por combinações químicas que atuam de forma benéfica sobre o metabolismo, além de conterem fósforo, proteína, glicídios, cálcio, ferro e vitaminas A e C (CAMARGO *et al.*, 2016).

3.1.3 Consumo e benefícios

Por conter os compostos e nutrientes mencionados anteriormente, observa-se que as folhas de batata-doce apresentam grande potencial para serem usadas na alimentação humana, embora elas sejam descartadas em grande escala, principalmente na América do Norte (AKOETEY; BRITAIN; MORAWICKI, 2017).

Dentre as formas de consumo, Sawazaki (2020) destaca que a folha da batata-doce deveria ser consumida como hortaliça nas principais refeições. Pode ser preparada cozida ou refogada, em caldos, sopas e até mesmo sucos.

De acordo com Laurie, Faber e Claasen (2018), a ingestão dessa planta pode ser eficaz para a prevenção e tratamento de doenças crônicas não-transmissíveis (DCNT) como diabetes e doenças cardíacas coronarianas além de que, na forma de chá, seu consumo auxilia no aumento da lactação (JOSÉ; CARVALHO; WIEST,

2012). Além disso, devido à presença de compostos fenólicos, possuem propriedades antioxidantes (SALAZAR, 2018).

3.2 Processo de secagem

O processo de secagem consiste na transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, em que o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no produto, provocando a redução do teor de água (GONELI *et al.*, 2014). Durante esse processo, a transferência de calor é encerrada quando se atinge um equilíbrio, ou seja, quando não há mais alterações significativas na temperatura da amostra. Já a transferência de massa se dá em decorrência da pressão de vapor da amostra ser maior que a do ar. Desse modo, a umidade que está presente nela passa a ser transferida ao seu redor, até o momento em que ocorra uma igualdade entre as pressões de vapor dentro e fora do sistema (NASCIMENTO, 2014).

A secagem é um método importante de armazenamento e conservação de algumas folhas, assegurando a qualidade e estabilidade após a colheita (GONELI *et al.*, 2014). Esse processo permite a preservação do produto e minimização das perdas no conteúdo e na composição dos princípios ativos, fazendo que com que o uso da planta seja possível a qualquer tempo (KAYA; AYDIN, 2009). Contudo, é relevante que as condições em que esse processo ocorre sejam levadas em consideração, pelo fato de serem muito importantes para manter a qualidade do produto (SOYSAL; ÖZTEKIN, 1999).

3.2.1 Tipos de secagem

Segundo a Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC, 2003), o processo de secagem pode ocorrer de duas maneiras diferentes, natural ou artificial. Na secagem natural, a matéria-prima é exposta à radiação solar durante longos períodos de tempo, sem controle de temperatura, ventos com intensidade moderada e baixas umidades relativas. Trata-se de um método demorado e que é propício a perdas de material. Já a secagem artificial faz uso de equipamentos que condicionam o ar de secagem através do controle da temperatura, umidade relativa e velocidade

do ar. Nesse sistema, ocorre o transporte do calor para o objeto a ser desidratado por meio de ar quente, promovendo a evaporação da água contida nele. Como o ar de secagem não depende de fatores climáticos, ocorre o favorecimento da obtenção de produtos com maior qualidade e em menor tempo.

3.2.2 Características da secagem convectiva

Dentre os tipos de secagem artificial, a convectiva é amplamente empregada na desidratação de alimentos (NASCIMENTO, 2014). Isso, devido ao fato de proporcionar a diminuição do teor de água no produto, minimizando o crescimento de microrganismos e reações de deterioração química, possibilitando assim maior qualidade durante a estocagem (SILVA *et al.*, 2015).

Ela é caracterizada pelo contato direto entre o ar quente com a superfície do produto a ser desidratado, que difunde energia pelo seu interior. Assim, ocorre um gradiente de pressão de vapor d'água entre o interior e exterior do produto, que acarreta a remoção de água do interior para a superfície. Nesta etapa, ar em movimento retira o vapor formado. Dessa forma, trata-se de uma transferência simultânea de calor e massa, em que os mecanismos mais comuns de transferência de massa são a difusão de vapor, difusão líquida e escoamento de líquido e vapor (CORRÊA, 2014). Já os mecanismos de transferência de calor incluem condução, convecção e radiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

3.2.3 Variáveis do processo de secagem

Dentre os fatores que influenciam e afetam o processo de secagem destacam-se a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar (ZEN, 2010).

A temperatura é um fator importante para a secagem pois o seu aumento promove um processo de evaporação de água mais rápido. De acordo com Zen (2010), isso ocorre porque o produto absorve calor do ar quente, o que provê o calor latente necessário para evaporar a água da superfície. Contudo, as plantas são materiais sensíveis e as temperaturas às quais são submetidas podem causar alterações na quantidade e qualidade dos princípios ativos (SANTOS *et al.*, 2020).

Dessa forma, indica-se a secagem entre 40°C e 60°C para as folhas em geral, independente do método empregado (MELO; RADÜNZ; MELO, 2004).

Em relação à umidade relativa, Zen (2010) afirma que uma redução no seu teor permite que água evapore rapidamente de uma superfície molhada. Isso acontece devido ao fato de que a diferença de concentração entre a água no produto e o ar de secagem aumenta, maximizando, assim, a força motriz para o processo de transferência de massa ocorrer.

Quanto à velocidade ar, quando esta é muito baixa, o vapor de água deixa a superfície do produto e aumenta a umidade do ar na camada limite, o que provoca uma redução na taxa de secagem (PILATTI, 2013).

3.3 Coeficiente de difusão efetivo

A força motriz para que aconteça o processo de transferência de massa é a diferença entre as concentrações de soluto em um solvente, em que o fluxo da matéria em massa ou mols ocorre da maior concentração para a menor (CREMASCO, 2016). Durante esse processo a difusão é dependente da temperatura, composição do sistema e da pressão (BERMAN, 2014).

Na primeira Lei de Fick (Equação (1)), considera-se a difusão em estado estacionário. Nessa equação, a constante de proporcionalidade corresponde ao coeficiente de difusão e é governado pela interação soluto-meio, sendo definido como a mobilidade do soluto no meio (CREMASCO, 2016).

$$J_{A,z} = -D_{ef} \frac{dC_A}{dz} \quad (1)$$

Em que $J_{A,z}$ corresponde ao fluxo difusivo da espécie química A na direção z, D_{ef} é o coeficiente de difusividade efetiva e C_A é a concentração molar da espécie química A.

Para a difusão em regime transiente, a segunda Lei de Fick é representada pela Equação (2) (CREMASCO, 2016):

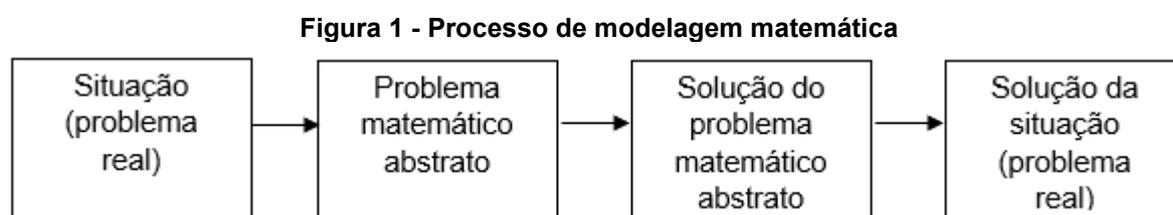
$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 C_A \quad (2)$$

No processo de secagem, o coeficiente de difusão efetivo pode ser entendido como a facilidade com que a água é removida do produto e representa o efeito de

todos os fenômenos que podem intervir no processo de migração da água (SILVA *et al.*, 2018). Esse valor pode ser obtido por meio de ajuste de modelo matemático aos valores experimentais de secagem e é importante porque possibilita avaliar a velocidade com que ocorre o processo de secagem para o produto, além de possibilitar a avaliação energética do processo (BOTELHO *et al.*, 2015).

3.4 Modelagem matemática

De acordo com Bassanezi (2011), a modelagem matemática consiste em transformar situações reais em problemas matemáticos, em que a interpretação das soluções ocorre em linguagem usual, ou seja, trata-se de um processo de representação de problemas reais em termos matemáticos, com o objetivo de encontrar soluções para tais problemas (BERTONE; BASSANEZI; JAFELICE, 2014). Na Figura 1 apresentam-se os procedimentos para o processo de modelagem matemática:



Fonte: Adaptado de Bertone, Bassanezi e Jafelice (2014)

Para o processo de secagem, é possível utilizar modelagem matemática para prever o comportamento de um produto com relação a perda de umidade no decorrer do tempo (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

3.4.1 Modelos matemáticos

Um modelo matemático pode ser definido como uma formulação ou equação que expressa as características de um sistema em termos matemáticos (CHAPRA; CANALE, 2008), ou seja, é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam o objeto estudado (BASSANEZI, 2011).

Para o processo de secagem, os modelos matemáticos permitem analisar e determinar o comportamento do secador, podendo ser possível estimar o tempo necessário para a redução do teor de água do produto em diferentes condições de secagem. Assim, tornam-se ferramentas úteis para buscar uma alta eficiência durante a desidratação, sem deixar de preservar as características das folhas (RADÜNZ *et al.*, 2014).

Para prever o processo de secagem em diversos tipos de produtos, incluindo plantas, podem ser utilizados os modelos empíricos, semi-empíricos e fenomenológicos (GASPARIN; CHRIST; COELHO, 2017). De acordo com Goneli *et al.* (2014), os modelos empíricos podem representar a relação causa-efeito sem estarem baseados nos fenômenos envolvidos no processo de secagem. O fenômeno, nesse caso, é representado por equações diferenciais que podem ter soluções analíticas ou numéricas. Esses tipos de modelos apresentam relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem. Contudo, não fornecem um panorama dos processos importantes que ocorrem durante a secagem (GONELI *et al.*, 2014).

Os modelos semi-empíricos são os que aliam teoria com a facilidade de uso. Eles presumem que as condições de secagem são isotérmicas e que a resistência à transferência é restringida somente à superfície do produto (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Dessa forma, esse tipo de modelo não reflete toda a complexidade do processo de secagem (PIRES, 2013).

Já os modelos fenomenológicos podem ser obtidos através de leis da conservação de massa, energia e movimento. Baseam-se na teoria do processo, caracterizando-se como modelos mais complexos (SILVA, 2015).

3.4.2 Estado da arte sobre experimentos de secagem de plantas

Apesar de o termo PANC ser recente, as Plantas Alimentícias Não Convencionais sempre existiram e, com o passar do tempo, foram sendo descobertas pela humanidade (THEIS, 2019). Contudo, o número de estudos sobre elas ainda é reduzido (KINUPP; LORENZI, 2014) e, especificamente para a folha da batata-doce não é possível encontrar uma análise da cinética de secagem na literatura.

Em seu trabalho, Gonelli *et al.* (2014) avaliaram a cinética de secagem das folhas de erva baleeira (*Cordia verbenácea*), ajustando diferentes modelos

matemáticos aos dados obtidos experimentalmente de razão de umidade, além de determinar os valores de coeficiente de difusão efetivo, para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Com os resultados obtidos, concluiu-se que o Modelo de Midilli foi o que apresentou melhor ajuste. Além disso, foi possível determinar que o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, sendo que os valores encontrados foram de $1,1294 \cdot 10^{-11}$, $3,1994 \cdot 10^{-11}$, $5,9511 \cdot 10^{-11}$ e $9,4933 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Em estudo similar, Alves (2017) determinou que, para as folhas da planta conhecida como Cheirosa (*Hyptis suaveolens*), o modelo que melhor representou o processo de secagem nas temperaturas de 35, 45 e 55°C também foi o de Midilli.

Segundo Velasco (2019), para as folhas de cana de açúcar novamente o modelo de Midilli foi o que melhor ajustou-se aos dados experimentais de secagem, nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. Além disso, constatou-se que os coeficientes de difusividade efetiva elevaram com o aumento da temperatura, variando entre $1,3 \cdot 10^{-7}$ a $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Em estudo sobre a secagem das folhas de ora-pro-nobis (*Pereskia* sp.), Gollner-Reis (2019) avaliou o processo de secagem convectiva e dessorção dessa PANC através de modelagem matemática, conduzindo a secagem em temperaturas entre 40 e 60°C. Foi possível determinar que o modelo de Dois-Termos apresentou melhor concordância com os resultados experimentais.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Coleta e preparo das amostras

As folhas de batata-doce foram coletadas manualmente na Linha São Marcos, zona rural do município de Francisco Beltrão-PR, durante o mês de outubro de 2021. A coleta sempre foi feita no período matutino, nunca após a ocorrência de precipitação pluviométrica ou irrigação, a fim de evitar variações no teor de água inicial das folhas. Na Figura 2 apresenta-se a planta da batata-doce a partir da qual as folhas foram coletadas.

Figura 2 - Exemplares de folhas de batata-doce utilizadas neste estudo



Fonte: Autoria própria (2021)

Após a coleta, as folhas foram armazenadas em sacos herméticos e transportadas até o laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Francisco Beltrão-PR. Então, descartaram-se as folhas que apresentavam algum tipo de dano físico e as que estavam íntegras tiveram seus pecíolos removidos e foram padronizadas com comprimentos de 3,5 cm e larguras de 1,5 cm (ARAÚJO *et al.*, 2015) aproximadamente, como apresentado na Figura 3. Essa padronização ocorreu para realizar uma aproximação da amostra com um formato de placa plana, a fim de realizar a determinação do coeficiente de difusão efetivo.

Figura 3 - Padronização no tamanho das folhas



Fonte: Autoria própria (2021)

4.2 Determinação do teor de umidade inicial e final

Depois de feita a seleção e padronização dos tamanhos, parte das folhas foram destinadas à determinação da umidade inicial pelo método de estufa com circulação forçada de ar à 105 °C, durante 24 horas (ARNOSTI, 1997). Esse ensaio foi realizado em triplicata, em placas de petri contendo aproximadamente 15 g de folhas. Encerrado o período de secagem, as amostras foram pesadas e determinou-se o teor de umidade pela Equação (3) (CANHA, 2000):

$$U (\%) = \left(\frac{m_0 - m_f}{m_0} \right) * 100 \quad (3)$$

Em que m_0 e m_f , representam a massa (em gramas) no início e ao final da análise, respectivamente.

A determinação do teor de umidade final foi feita de forma similiar, utilizando-se a massa das amostras obtidas após os experimentos de secagem.

4.3 Experimentos de secagem

Os experimentos de secagem foram feitos em triplicata utilizando-se, aproximadamente, 15 gramas de amostras (Figura 4), em estufas com circulação forçada de ar, para diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C). Durante o processo realizaram-se pesagens periódicas, até se atingir o teor de

água final aproximado de 10% b.u. A determinação da massa que corresponde à esse teor foi feita através da Equação (4):

$$m_f = m_i * \frac{(100 - U_i)}{(100 - U_f)} \quad (4)$$

Onde m_f e m_i correspondem à massa do produto depois de seco e à massa inicial, em gramas, respectivamente, U_i refere-se à umidade inicial e U_f é relacionada à umidade que se deseja alcançar.

Figura 4 – Preparação para ensaios de secagem



Fonte: Autoria própria (2021)

4.4 Determinação e adimensionalização da umidade instantânea

Com os valores de massa obtidos durante os ensaios de secagem, foi possível determinar o teor de umidade instantâneo (b.u) através da Equação (5):

$$U_i = \frac{(U_f - U_0) * (m_i - m_0)}{m_f - m_0} + U_0 \quad (5)$$

Em que: i corresponde ao instante no qual a amostra foi pesada; U_f e U_0 as umidades final e inicial, respectivamente, em porcentagem; m_f e m_0 a massa das amostras no final e ao início do processo de secagem, em gramas.

Para realizar a modelagem matemática da perda de umidade das folhas de batata-doce, os teores de umidade instantânea (U_i) foram convertidos em razões de umidade (RU), através da Equação (6). A razão de umidade é um parâmetro adimensional, em que a umidade de equilíbrio representa a umidade de equilíbrio do

produto nas condições do processo de secagem, em % (g_{água}/100 g) (GOLLNER-REIS, 2019).

$$RU = \frac{U_i - U_f}{U_0 - U_f} \quad (6)$$

4.5 Modelagem matemática

Com base nos valores médios de RU obtidos para cada ensaio realizado, foi possível modelar o processo de perda de umidade das folhas no decorrer do tempo, através do ajuste de diferentes modelos matemáticos. Na Tabela 1 apresentam-se os modelos testados (Equações (7) à (13)), em que t representa o tempo, em minutos, a , b , k_0 , k são constantes de secagem adimensionais e n corresponde à parâmetros dos modelos, também adimensional.

Tabela 1 – Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem

Modelo	Equação	Referência	
Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	Kane <i>et al.</i> (2008)	(7)
Lewis	$RU = \exp(-k_0t)$	Lewis (1921)	(8)
Page	$RU = \exp(-k_0t^n)$	Page (1949)	(9)
Henderson e Pabis	$RU = a_0 \exp(-k_0t)$	Panchariya <i>et al.</i> (2002)	(10)
Newton	$RU = \exp(-kt)$	O'Callaghan <i>et al.</i> (1971)	(11)
Page Modificado	$RU = \exp(-kt)^n$	Overhults <i>et al.</i> (1973)	(12)
Parry	$RU = a_0 \exp(-k_0t) + b$	Parry (1985)	(13)

Fonte: Autoria própria (2021)

O ajuste dos modelos foi realizado por meio de análises de regressão não linear pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt, com o auxílio do *software* livre SciDAVis.

4.6 Avaliação dos modelos matemáticos

Para analisar o grau de adequação dos modelos ao processo de secagem, geralmente avalia-se a diferença entre o valor experimental e o previsto pelo ajuste avaliado. Dessa forma, podem ser empregados métodos estatísticos para determinação e avaliação de erros (JAYAS, 1991).

Para a secagem da folha de batata-doce, o grau de adequação dos modelos foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), apresentado na Equação (14). Essa ferramenta é comumente utilizada porque penaliza modelos com maior número de estimadores, o que acarreta em análises mais precisas (MONTGOMERY *et al.*, 2012).

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{SQ_e}{n_{mod} - p_{mod}}}{\frac{SQ_t}{n_{mod} - 1}} \quad (14)$$

Onde SQ_e corresponde à soma quadrática do erro (Equação 15), SQ_t é a soma quadrática total (Equação 16), n_{mod} representa o número de observações realizadas e p_{mod} , o número de estimadores dos modelos (MONTGOMERY *et al.*, 2012).

$$SQ_e = \sum_{i=1}^{n_{mod}} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (15)$$

$$SQ_t = \sum_{i=1}^{n_{mod}} (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (16)$$

Em que Y_i corresponde ao valor obtido da i -ésima observação, \hat{Y}_i representa o valor previsto pelo modelo, para a respectiva observação e \bar{Y} é o valor médio das repetições.

Outro parâmetro avaliado foi o chi-quadrado reduzido (X^2), apresentado na Equação (17), em que GL é o grau de liberdade do modelo (Equação 18):

$$X^2 = \frac{1}{GL} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (17)$$

$$GL = n - C_{mod} \quad (18)$$

Em que n é o número de observações realizadas e C_{mod} corresponde ao número de constantes estimadas pelo modelo.

Também avaliou-se o grau de adequação dos modelos ao processo de secagem através da magnitude do erro médio relativo (P), apresentado na Equação (19):

$$P = \frac{100}{n} \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right) \quad (19)$$

Para determinar os modelos que melhor ajustaram-se aos dados experimentais, consideraram-se os que apresentavam R^2 mais próximo da unidade e menores valores de X^2 e P .

4.7 Determinação do coeficiente de difusão efetivo

Para determinação do coeficiente de difusão efetivo assumiu-se a forma geométrica de placa plana. Dessa forma, foi possível ajustar o modelo matemático de difusão líquida, apresentado na Equação (20), aos dados experimentais da secagem da folha de batata-doce obtidos para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Essa equação é a solução analítica para a segunda Lei de Fick (Equação 2) e apresenta aproximação de oito termos (GONELI *et al.*, 2014):

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} \exp \left[-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4} \left(\frac{S}{V}\right)^2 \right] \quad (20)$$

Em que D_{ef} corresponde ao coeficiente de difusão efetivo ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$), N é o número de termos, t é o tempo (min), S é área da superfície do produto (cm^2) e V é o volume do produto (cm^3).

A área da superfície (S) foi calculada por meio da Equação (21), em que b corresponde à largura da folha (cm) e H ao comprimento (cm).

$$S = b H \quad (21)$$

Para o cálculo de volume (V), utilizou-se a Equação (22), que relaciona a espessura (e) das folhas da batata-doce com a área da superfície (S). Para a obtenção desses dados, as dimensões das amostras padronizadas foram medidas com auxílio de um paquímetro.

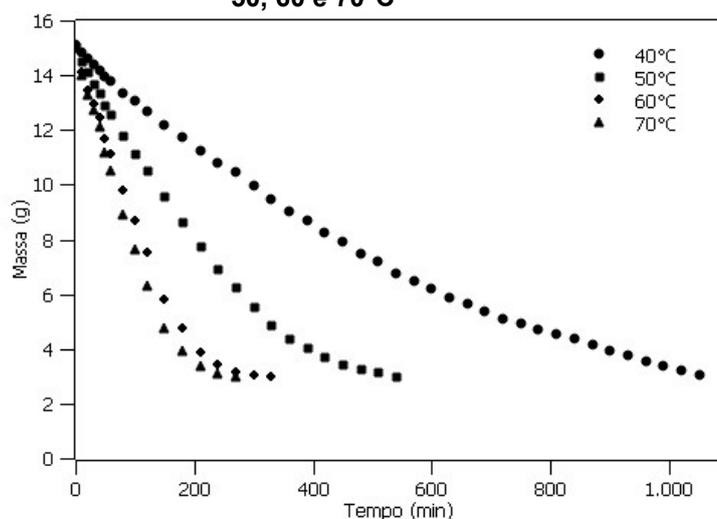
$$V = S \cdot e \quad (22)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação da perda de massa no processo de secagem

Para todas as temperaturas avaliadas, o comportamento da perda de massa das folhas de batata-doce foi correspondente ao indicado por Park *et al.* (2014), em que durante a primeira hora de secagem ocorre uma redução intensa de massa. Após esse período, essa perda ocorre de forma mais vagarosa, tendendo à estabilização no decorrer do processo. Isso indica que ocorre uma maior resistência a transferência de calor e massa do interior do produto para sua superfície (KASHANINEJAD *et al.*, 2007). Na Figura 5 apresenta-se o comportamento da perda de massa para todas as temperaturas avaliadas:

Figura 5 - Perda de massa de folha de batata-doce durante secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C



Fonte: Autoria própria (2021)

É possível observar que para a temperatura de 40°C as folhas atingiram a massa desejada em um período de, aproximadamente, 18 horas. Já as secagens para 50, 60 e 70°C ocorreram de forma mais rápida, levando em torno de 9, 5 e 4 horas, respectivamente. O mesmo comportamento foi relatado por diversos pesquisadores, incluindo Lemos *et al.* (2016) durante estudo sobre a cinética de secagem do espinafre, em que temperaturas mais altas promoveram a estabilização das massas das amostras em menor período de tempo.

De acordo com Leite *et al.* (2015), o aumento da temperatura durante a secagem provoca uma elevação no fornecimento de energia em forma de calor, o que diminui o tempo para o produto atingir o equilíbrio. Contudo, em condições de temperaturas elevadas pode ocorrer a degradação e a oxidação de nutrientes da planta (TONON; BARONI; HUBINGER, 2006).

5.2 Teores de umidade inicial e final

Na Tabela 1 apresentam-se os teores de umidade inicial e final médios para as folhas de batata-doce:

Tabela 2 - Umidades inicial (U_0) e final (U_f) médias de folhas de batata-doce após secagem convectiva em quatro temperaturas

Temperatura (°C)	U_0 (%)	U_f (%)
40	82,36	13,66
50	82,36	11,77
60	82,36	11,31
70	82,36	9,70

Fonte: Autoria própria (2021)

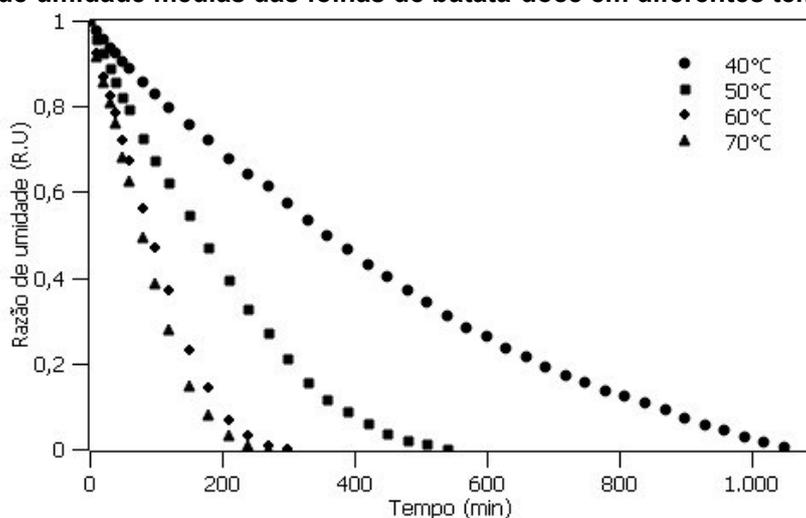
Os teores de umidade das folhas de batata-doce alcançados após o processo de secagem foram distintos para todas as temperaturas, embora fosse desejado obter a umidade de 10% b.u., teor esse adequado para o armazenamento de forma segura do produto (GONELI *et al.*, 2012). Para a temperatura de 40°C, o teor de umidade não reduziu tanto quanto para as temperaturas mais altas, mesmo levando mais tempo para que fosse obtida a massa desejada. Desse modo, não indica-se essa temperatura para a secagem dessa planta, pois pode afetar negativamente a conservação da mesma.

5.3 Adimensionalização da umidade instantânea

Com a obtenção dos dados de perda de massa após a realização dos experimentos de secagem, foi possível determinar a umidade instantânea média das folhas de batata-doce (Apêndice A), através da Equação (4). Na Figura 6 apresentam-

se as razões de umidade médias das folhas de batata-doce para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C.

Figura 6 - Razões de umidade médias das folhas de batata-doce em diferentes temperaturas



Fonte: Autoria própria (2021)

Como é possível observar, para maiores temperaturas a razão de umidade atingiu valores mais próximos à zero em menor período de tempo. Esse comportamento também foi observado por Costa *et al.* (2018) para a secagem da banana.

5.4 Ajuste das curvas de cinética de secagem

O ajuste ocorreu pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt, sendo empregados sete modelos descritos na literatura: Wang e Singh, Lewis, Page, Henderson e Pabis, Newton, Page Modificado e Parry. A adequação dos modelos foi determinada através do coeficiente de determinação (R^2), contudo, a avaliação de apenas um parâmetro estatístico não é confiável para a seleção de modelos não-lineares (ALMEIDA *et al.*, 2021). Desse modo, avaliou-se também o chi-quadrado reduzido (X^2) e erro médio relativo (P). Na Tabela 3 apresentam-se os resultados da avaliação da adequação para esses modelos, sendo apresentados R^2 e X^2 como valores decimais e P em porcentagem.

Tabela 3 - Resultados da análise estatística dos modelos de secagem ajustados para a folha de batata-doce

Modelo	T (°C)	R ²	X ²	P (%)
Wang e Singh	40	0,9993	0,003055	4,26
	50	0,9997	0,000955	3,93
	60	0,9975	0,004854	6,31
	70	0,9968	0,005748	5,94
Lewis	40	0,9814	0,080843	189,9
	50	0,9791	0,060550	67,38
	60	0,9665	0,065186	114,08
	70	0,9664	0,061336	96,51
Page	40	0,9940	0,026166	111,24
	50	0,9948	0,015152	29,13
	60	0,9945	0,010592	36,49
	70	0,9960	0,007307	25,01
Henderson e Pabis	40	0,9838	0,070622	178,08
	50	0,9832	0,048632	59,54
	60	0,9738	0,051024	98,89
	70	0,9744	0,046758	82,31
Newton	40	0,9814	0,080884	40,49
	50	0,9791	0,006055	67,38
	60	0,9665	0,065186	114,08
	70	0,9664	0,061337	96,51
Page Modificado	40	0,9940	0,026169	189,97
	50	0,9948	0,015152	67,38
	60	0,9945	0,010592	114,1
	70	0,9960	0,007307	96,5
Parry	40	0,9979	0,004111	10,46
	50	0,9981	0,005432	14,62
	60	0,9938	0,011959	22,87
	70	0,9924	0,013898	23,19

Fonte: Autoria própria (2021)

Analisando a Tabela 3, é possível observar que o coeficiente de determinação (R²) de todos os modelos aplicados apresentou valores superiores à 0,96 (R² > 0,96). Contudo, o modelo de Wang e Singh foi o que melhor ajustou-se aos dados experimentais, para todas as temperaturas, apresentando valores de R² mais próximos à unidade, indicando uma representação eficiente do comportamento do processo de secagem (GONELI *et al.*, 2014).

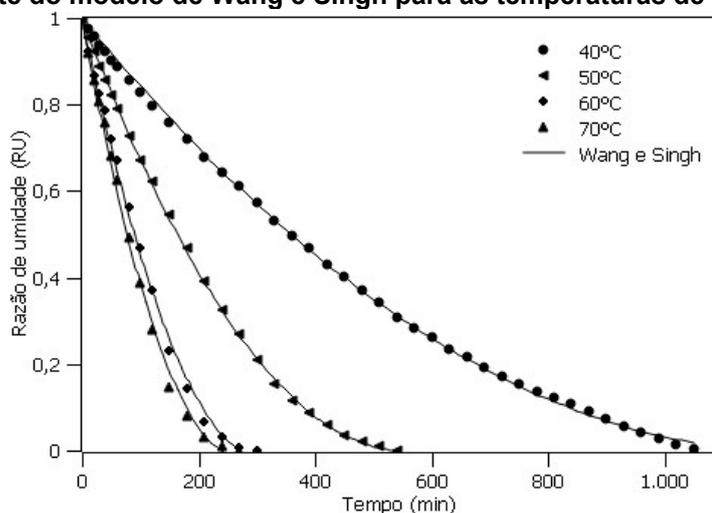
Uma vez que a utilização do coeficiente de determinação como único parâmetro estatístico não constitui um bom critério de avaliação para a seleção dos modelos de secagem, torna-se necessária a análise de outros parâmetros (GONELI *et al.*, 2014), como chi-quadrado reduzido (X^2) e erro médio relativo (P).

Constatou-se que a maioria dos modelos avaliados apresentou valores de P superiores a 10% (Tabela 3), o que os torna inadequados para descrever o fenômeno de secagem (MOHAPATRA; RAO, 2005). Além disso, como os valores de chi-quadrado reduzido e erro médio relativo indicam a variação dos valores observados, em relação à curva estimada pelo modelo (GONELI *et al.*, 2014), é preciso que estes sejam os menores possíveis. Dessa forma, o modelo de Wang e Singh foi o que apresentou menores valores de X^2 e P, para todas as temperaturas avaliadas.

Nesse contexto, é possível afirmar que o modelo de Wang e Singh é o que melhor representa o processo de secagem das folhas de batata-doce, dentre os modelos avaliados. Com esse modelo obteve-se os coeficientes de determinação de 0,9993, 0,9997, 0,9975 e 0,9968, chi-quadrado reduzido de 0,003055, 0,000955, 0,004854 e 0,005748 e erro médio relativo de 4,26%, 3,93%, 12,92% e 13,96% para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. Por se tratar de um modelo empírico, não é possível definir um panorama dos processos importantes que ocorreram durante a secagem (GONELI *et al.*, 2014).

Na Figura 7 apresenta-se o ajuste do modelo de Wang e Singh para as temperaturas avaliadas. Os ajustes para os demais modelos avaliados apresentam-se no Apêndice B.

Figura 7 - Ajuste do modelo de Wang e Singh para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros obtidos para cada modelo:

Tabela 4 - Parâmetros dos modelos matemáticos para as temperaturas avaliadas

Modelo	T (°C)	a_0	b	k	k_0	n
Wang e	40	$-0,0016 \pm 9,6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} \pm 1,2 \cdot 10^{-8}$			
Singh	50	$-0,0036 \pm 1,8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6} \pm 4,3 \cdot 10^{-8}$			
	60	$-0,0065 \pm 1,1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5} \pm 4,5 \cdot 10^{-7}$			
	70	$-0,0075 \pm 1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5} \pm 6 \cdot 10^{-7}$			
Page	40			$0,0022 \pm 2,7 \cdot 10^{-5}$		$1,25 \pm 0,03$
Modificado	50			$0,0048 \pm 8,4 \cdot 10^{-5}$		$1,26 \pm 0,04$
	60			$0,0088 \pm 1,9 \cdot 10^{-4}$		$1,39 \pm 0,05$
	70			$0,0101 \pm 1,9 \cdot 10^{-4}$		$1,41 \pm 0,05$
Lewis	40				$0,002 \pm 5,5 \cdot 10^{-5}$	
	50				$0,005 \pm 1,9 \cdot 10^{-4}$	
	60				$0,008 \pm 5,3 \cdot 10^{-4}$	
	70				$0,009 \pm 6,3 \cdot 10^{-4}$	
Page	40				$0,0005 \pm 8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \pm 0,03$
	50				$0,0010 \pm 2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \pm 0,04$
	60				$0,0014 \pm 3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \pm 0,05$
	70				$0,0015 \pm 3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \pm 0,05$
Henderson	40	$1,036 \pm 0,01$			$0,0023 \pm 6,8 \cdot 10^{-5}$	
E Pabis	50	$1,050 \pm 0,02$			$0,0052 \pm 2,3 \cdot 10^{-4}$	
	60	$1,068 \pm 0,03$			$0,0094 \pm 6,6 \cdot 10^{-4}$	
	70	$1,073 \pm 0,04$			$0,0108 \pm 7,8 \cdot 10^{-4}$	
Newton	40			$0,002 \pm 5,5 \cdot 10^{-5}$		
	50			$0,005 \pm 1,9 \cdot 10^{-4}$		
	60			$0,008 \pm 5,3 \cdot 10^{-4}$		
	70			$0,009 \pm 6,3 \cdot 10^{-4}$		
Parry	40	$1,33821 \pm 0,01$	$-0,344 \pm 0,01$	$0,0013 \pm 2,3 \cdot 10^{-5}$		
	50	$1,26107 \pm 0,03$	$-0,252 \pm 0,03$	$0,0032 \pm 1,6 \cdot 10^{-4}$		
	60	$1,30664 \pm 0,06$	$-0,283 \pm 0,07$	$0,0057 \pm 6,3 \cdot 10^{-4}$		
	70	$1,26829 \pm 0,06$	$-0,236 \pm 0,06$	$0,0071 \pm 8,7 \cdot 10^{-4}$		

Fonte: Autoria própria (2021)

Com base na Tabela 4, é possível observar que a temperatura exerce importante influência sobre as constantes de secagem k_0 e k nos modelos de Page Modificado, Lewis, Henderson e Pabis, Newton e Parry. Isso, pois verificou-se que

esses valores aumentaram com a elevação da mesma, fato também observado por Barros *et al.* (2018) em estudo sobre a secagem em fécula de mandioca. De acordo com Corrêa *et al.* (2010), isso pode ser explicado devido às temperaturas mais altas acarretarem em maiores taxas de secagem, atingindo o teor de umidade de equilíbrio em menor tempo de desidratação.

Em relação ao parâmetro n dos modelos de Page e Page Modificado, Santos *et al.* (2017) afirmam que ele corrige os possíveis erros resultantes da negligência da resistência interna para a transferência de água. No caso da secagem de folhas de batata-doce, esses valores aumentaram com a elevação da temperatura, assim como observado por Reis *et al.* (2015) para a secagem da pimenta bico.

Para os modelos de Wang e Singh e Henderson e Pabis, a constante a também aumentou com o aumento da temperatura, conforme verificado por Santos *et al.* (2017) para a secagem da romã. Contudo, para o modelo de Parry esse comportamento não foi observado.

Já em relação à constante b do modelo de Wang e Singh, também se observou o aumento com a elevação da temperatura. Contudo, para o modelo de Parry, não constatou-se relação com a temperatura.

5.5 Determinação dos coeficientes de difusão efetivos

Na Tabela 5, são apresentados os resultados dos ajustes e os valores de coeficiente de difusão efetivos obtidos durante a secagem das folhas de batata-doce, para diferentes condições de temperatura de ar e considerando-se a espessura, largura e comprimento das amostras de 0,060, 1,5 e 3,5 cm, respectivamente. No Apêndice C podem ser observados os ajustes realizados.

Tabela 5 - Coeficientes de difusão efetivos obtidos para cada temperatura avaliada

Temperatura (°C)	R ²	$D_{ef} \cdot 10^{11}$ (m ² s ⁻¹)
40	0,9690	0,5
50	0,9646	1,16
60	0,9536	2
70	0,9533	2,3

Fonte: Autoria própria (2021)

Os coeficientes difusivos obtidos foram de $0,5 \cdot 10^{-11}$, $1,16 \cdot 10^{-11}$, $2 \cdot 10^{-11}$ e $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. Esses valores estão coerentes com os relatados na literatura para a secagem de produtos agrícolas, como plantas, que apresentam-se na ordem de 10^{-9} à $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLZ, 1996).

É possível perceber que o coeficiente de difusão efetivo das folhas de batata-doce aumentou com a elevação da temperatura de secagem. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que temperaturas mais altas fazem com que a viscosidade da água diminua. Como a viscosidade é uma forma de resistência do fluido ao escoamento, variações desta propriedade causam alterações na difusão da água nos capilares da folha, favorecendo a movimentação desse fluido no produto (GONELI *et al.*, 2014).

O aumento do coeficiente de difusão efetivo com a elevação da temperatura do ar de secagem também pode ser justificado devido à esse coeficiente ser dependente da temperatura, além da variedade e composição do produto de secagem (RIZVI, 1995). Ademais, o aumento no nível de vibração das moléculas com o incremento da temperatura também pode ter ocasionado o acréscimo no coeficiente de difusão (GONELI *et al.*, 2014).

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se o processo de secagem das folhas de batata-doce, realizando a modelagem matemática da cinética de secagem e a determinação do coeficiente de difusão efetivo nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C.

Foi possível observar que durante o processo de desidratação, o aumento na taxa de secagem foi resultante do aumento na temperatura do ar de secagem. Dessa forma, temperaturas mais altas promovem a melhor eficiência na retirada de água das folhas, correspondendo ao relatado por vários pesquisadores na literatura. Contudo, é preciso levar em consideração que a secagem em temperaturas mais altas envolvem maior custo energético e possibilitam a degradação de constituintes nutricionais do produto.

Dentre os sete modelos matemáticos avaliados, o modelo de Wang e Singh foi o que melhor representou o processo de secagem das folhas de batata-doce, ajustando-se satisfatoriamente aos dados experimentais. Para esse modelo, obteve-se os coeficientes de determinação de 0,9993, 0,9997, 0,9975 e 0,9968, chi-quadrado reduzido de 0,003055, 0,000955, 0,004854 e 0,005748 e erro médio relativo de 4,26%, 3,93%, 12,92% e 13,96% para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente.

Em relação à difusividade, verificou-se que ela depende da temperatura do ar de secagem, sendo que os coeficientes de difusão efetivos aumentaram com a elevação de temperatura. Os valores obtidos ficaram entre $0,5 \cdot 10^{-11}$ e $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as folhas de batata-doce, na faixa de temperatura de 40-70°C, sendo coerentes com os estudos disponíveis na literatura.

Nesse contexto, é possível afirmar que o trabalho realizado foi importante para proporcionar dados sobre o processo de secagem da folha de batata-doce, visto que essa é uma planta ainda pouco estudada. Além disso, conhecendo os valores de coeficientes de difusão efetivos pode-se determinar parâmetros termodinâmicos que possibilitem a realização de uma análise energética do processo de secagem. Ademais, sugere-se que ainda sejam realizados estudos avaliando a influência dos parâmetros de secagem em características como teores de fibras e minerais, além de compostos bioativos. Dessa forma, seria possível determinar a temperatura de secagem propícia para que a qualidade nutricional da folha não seja prejudicada.

REFERÊNCIAS

- AGEITEC. **Secagem e desidratação**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CO NT000fid5sgie02wyiv80z4s473tokdiw5.html. Acesso em: 10 jul. 2021.
- AKOETHEY, W.; BRITAIN, M. M.; MORAWICKI, R. O. Potencial para utilização de subprodutos do cultivo e processamento de batata-doce. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.47, 2017.
- ALMEIDA, M. E. F. de; *et al.* Caracterização química das hortaliças não convencionais conhecidas como *ora-pro-nobis*. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 30, n. 1, p. 431–439, 2014.
- ALMEIDA, R. L. J.; *et al.* Modelagem matemática aplicada a cinética da pasta de amido de feijão preto. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, 2021.
- ALVES, J. J. L. Cinética de secagem das folhas de *Hyptis suaveolens*. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, São Paulo, v.19, n.2, p.168-176, 2017.
- ARAÚJO, C. S.; *et al.* **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de jambu durante a secagem**. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Universidade Federal de São Carlos, 2015.
- ARNOSTI JR, S. **Desenvolvimento de um secador transportador do tipo esteira com escoamento cruzado e caracterização de sementes de gramíneas**. 1997. Dissertação (Mestrado). São Carlos-SP: PPG-EQ/UFSCar, 1997.
- BARROS, S. L.; *et al.* **Modelagem da cinética de secagem em féculas de mandioca (*Manihot esculenta crantz*)**. In: III Congresso Internacional das Ciências Agrárias, COINTER-PDVAGRO, 2018.
- BERMAN, T. L. **Incropera: fundamentos de transferência de calor e massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- BERTONE, A. M. A.; BASSANEZI, R. C.; JAFELICE, R. S. M. da. **Modelagem matemática**. Uberlândia, MG: UFU, 2014.
- BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. 3. ed. São Paulo: Contexto, 2011.
- BIEMBENGUT, M. S.; HEIN, N. **Modelagem matemática no ensino**. São Paulo: Contexto, 2000.
- BOTELHO, F. M.; *et al.* Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n.2, p. 260-271, 2015.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992.

CAMARGO, L. K. P. **Caracterização de acessos de Batata doce do Banco de Germoplasma da Unicentro, PR.** 2013. Tese (Pós-Graduação em Agronomia) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2013.

CAMARGO, L. K P; *et al.* Uso de índice de seleção na identificação de genótipos de batata doce com diferentes aptidões. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 4, out.-dez. 2016.

CANHA, M.A. **Estudo da transferência de massa na secagem de gelatina.** Determinação de isotermas de equilíbrio. 2000. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química, UEM, Maringá-PR, 2000.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** 4. ed. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia.** 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de Transferência de Massa.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

CORRÊA, P. G. **Secagem convectiva de abacaxi combinada com aplicação de potência de micro-ondas variável.** 2014. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goyatacazes-RJ, 2014.

CORRÊA, P. C.; *et al.* Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

COSTA, Z. R. T.; *et al.* **Modelos matemáticos da cinética de secagem de banana (*Musa ssp*).** In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Maceió/AL, 2018.

DE JESUS, B. B. S.; *et al.* PANCS-Plantas Alimentícias Não Convencionais, potencial econômico e resgate da cultura: uma revisão sistemática. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer-Jandaia-GO, v. 17, n. 33, p.309, 2020.

EDMOND, J. B.; AMMERMAN, G. R. **Sweet potatoes: production-processing marketing.** Wesport: The Air Publishing Company, 1971.

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 Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 2, p. 242-250, abr-jun, 2017.

GOLLNER-REIS, J. P. **Modelagem Matemática da Secagem Convectiva e Dessorção das Folhas de *Ora-Pro-Nobis* (*Pereskia sp.*).** Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Métodos Matemáticos Aplicados). Francisco Beltrão, 2019.

GONELI, A.L.D.; *et al.* **Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea DC.*).** Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS, outubro/2012.

GONELI, A. L. D.; *et al.* Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

GONÇALVES, A. L. **Um estudo sobre a importância da modelagem matemática como metodologia de ensino**. Monografia de TCC, Faculdade Alfredo Nasser, Aparecida de Goiânia, 2010.

ISLAM, S. Nutritional and Medicinal Qualities of Sweetpotato Tops and Leaves. **Cooperative Extension Service**. University of Arkansas, 2014.

JAYAS, D. S. *et al.* Review of thin layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, v. 9, n. 3, p. 551-588, 1991.

JOSÉ, A. E.; CARVALHO, H. H. C.; WIEST, J. M. Avaliação do efeito antibacteriano de extratos de folhas de batata-doce (*Ipomoea batatas* L.) frente a bactérias de interesse em alimentos e correlação com os compostos fenólicos. **Revista Ceres**, v. 62, n. 5, 2012.

KANE, C. S. E. *et al.* Single-layer drying behavior of mexican tea leaves (chenopodium ambrosioides). **Chemical Engineering Communications**, v. 195, p. 787-802, 2008.

KASHANINEJAD, M.; *et al.* Thin layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p. 98-108, 2007.

KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 118-124, 2009.

KELEN, M. E.; *et al.* **Plantas alimentícias não convencionais (PANCs): hortaliças espontâneas e nativas**. UFRGS, Porto Alegre, 2015.

KINUPP, V. F.; LORENZI, H. **Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANC) no Brasil**: guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, p. 768, 2014.

LAURIE, S. M.; FABER, M.; CLAASEN, N. Incorporating orange-fleshed sweet potato into the food system as a strategy for improved nutrition: The context of South Africa. **Food Research International**, v. 104, n. April 2017, p. 77-85, 2018.

LEITE, A. L. M. P.; *et al.* Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n.2, p.155-162. 2015.

LEMOS, C. D. L.; *et al.* **Cinética de secagem do espinafre (*Tetragonia tetragonoides*)**. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino de Ciências, 2016.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LIBERATO, P. S.; LIMA, D. V. T.; SILVA, G. M. B. PANCs – Plantas Alimentícias não Convencionais e seus benefícios nutricionais. **Environmental Smoke**, v. 2, n. 2, p. 102-111, 2019.

MADAMBBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thinlayer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.

MAJOLO, L.; LIMA, D. M. F.; SANTOS, S. A. **Plantas alimentícias não convencionais (PANCs) como promotoras de segurança alimentar e nutricional: diagnóstico inicial para projeto de extensão**. Congresso Brasileiro de Agroecologia, 2014.

MARTINS, F. P. M. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences** – jCEC, v. 06, n. 04, 2020.

MELO, E. C.; RADÜNZ, L. L.; MELO, R. D. A. Influência do processo de secagem na qualidade de plantas medicinais—Revisão. **Engenharia na Agricultura**, v. 12, n. 4, p. 307-315, 2004.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, n.4, p.513-8, 2005.

MONTGOMERY, D. C. *et al.* **Estatística aplicada à engenharia**. 2. ed. [S.l.]: LTC, 2012.

NASCIMENTO, A. P. S.; *et al.* Secagem convectiva e influência da temperatura nas propriedades físico-químicas das amêndoas de girassol comercial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.20, n.3, p.227-238, 2018.

NASCIMENTO, V. R. G. **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleifera lam**. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual De Campinas, Campinas, 2014.

O'CALLAGHAN, J. R.; *et al.* Digital simulation of agricultural dryer performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.16, n.3, p. 223-244. 1971.

OVERHULTS, D. G. *et al.* Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, v. 16, p. 112-113, 1973.

PAGE, G. E. **Factors Inuencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers**. February 1949. Dissertação (Master of Science in Mechanical Engineering) - Perdue University, Ann Arbor, 1949.

PANCHARIYA, P. C. *et al.* Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 349-357, 2002.

PARK, K. J. B. *et al.* Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.

PARRY, J.L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A Review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, n.1, p.1-29, 1985.

PILATTI, D. **Estudo da secagem de erva-mate (Ilex paraguariensis)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2013.

- PIRES, J. F. M. de. **Modelação semi-empírica da secagem de bacalhau salgado verde**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013.
- RADÜNZ, L.L.; *et al.* Avaliação das curvas de secagem de guaco (*Mikania glomerata* Spreng.) em secador de bandejas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Campinas, v.16, n.2, p.378-387, 2014.
- RAMALHO, W. J. C. R. **Análise da cinética de secagem da batata-doce (*Ipomoea batatas*) por diferentes técnicas de secagem**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Paraíba, 2018.
- REIS, D. R.; *et al.* Influência das características do ar na cinética de secagem de pimenta variedade bico. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 18, n. 2, p. 146-154, 2015.
- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. **Engineering properties of foods**. New York: Academic Press, p. 223-309, 1995.
- SALAZAR, T. C. C. O. **Avaliação fitoquímica e antioxidante do extrato hidroetanólico da folha de batata-doce [*Ipomoea batatas* (L). Lam]**. 2018. Dissertação (Mestrado em Atenção Integrada à Saúde-Programa de Pós-Graduação em Atenção Integral à Saúde, Universidade de Cruz Alta, Cruz Alta-RS, 2018.
- SANTOS, F. S.; *et al.* Modelagem matemática da cinética de secagem da romã. **Revista Spacios**, v. 28, n. 52, p. 27, 2017.
- SANTOS, P. S. J.; *et al.* Alterações físico-químicas e biológicas dos óleos essenciais das folhas *Alpinia zerumbet* a partir de diferentes temperaturas de secagem. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 6, n.4, p. 22392-22403, 2020.
- SARTORI, V. C.; *et al.* **Plantas Alimentícias não Convencionais**. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul-RS, 2020.
- SAWAZAKI, E. K. M. **Efeitos positivos da suplementação com farinha de folha de batata-doce biofortificada sobre o metabolismo, adiposidade e estresse oxidativo em ratos wistar machos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas à Saúde) - Programa de pós-graduação *stricto sensu* em ciências aplicadas à saúde, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, 2020.
- SENFF, S. E. **Interação genótipos x ambientes em componentes morfológicos e produtivos de batata-doce (*Ipomoea batatas* L.)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Agronomia) -Centro de Ciências Sociais, Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2018.
- SILVA, D. P.; SANTOS, S. G. F.; RODOVALHO, R. S. **Modelagem matemática da secagem das folhas do Melão-de-São Caetano**. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Florianópolis, 2016.
- SILVA, E. T.; *et al.* Modelagem matemática da desidratação osmo-convectiva da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) utilizando soluções mistas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. v. 10, n. 4, p. 39 - 48, out-dez, 2015.

SILVA, I. L.; *et al.* Secagem e difusividade de sementes de melão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 309-315, 2018.

SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S. Equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. **Journal of agricultural Engineering Research**, v.74, n.3, p.317-324, 1999.

THEIS, J. S. **Estudo etnobotânico de plantas alimentícias não convencionais (PANC):** saberes e sabores da agricultura familiar em São Lourenço do Sul, RS. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

TERRA, S.B.; VIERA, C.T.R. Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs): levantamento em zonas urbanas de Santana do Livramento, RS. **Ambiência**. Guarapuava (PR) v.15 n.1 p. 112 - 130 Jan/Abr 2019.

TONON, R.V.; BARONI, A.F.; HUBINGER, M.D. Study of osmotic dehydration of tomato in ternary solutions through response surface methodology. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, 2006.

VELASCO, M. F. **Cinética de secagem de folhas de cana-de-açúcar.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Agronomia) -Instituto Federal Goiano, Ceres-GO, 2019.

VIZZOTTO, M; *et al.* Composição mineral em genótipos de batata-doce de polpas coloridas e adequação de consumo para grupos de risco. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 21, 2018.

XAVIER, G. Agroecologia e recursos alimentares não convencionais: contribuições ao fortalecimento da soberania alimentar e nutricional. **Revista de geografia agrária**, v. 10, n. 20, p. 227-245, jul. 2015

ZEN, F. G. **Estudo da secagem convectiva do bagaço de mirtilo visando minimizar a perda de compostos antocianicos.** Trabalho de conclusão em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010).

**APÊNDICE A - Dados experimentais da secagem de folha de batata-doce
(*Ipomoea batatas*)**

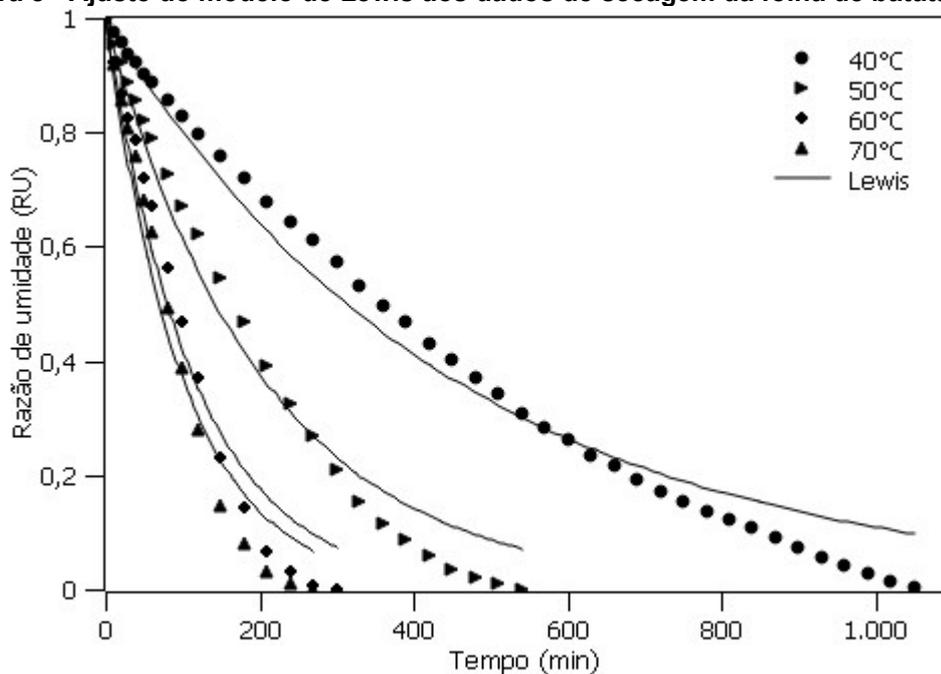
Tabela 6 - Dados experimentais da secagem de folha de batata-doce

Tempo (min)	40°C		50°C		60°C		70°C	
	m_f (g)	U_i (%)						
0	15,14	82,50	15,06	82,36	15,03	80,60	15,01	82,36
10	14,82	80,67	14,53	79,28	14,12	75,43	14,02	76,38
20	14,61	79,48	14,13	76,91	13,45	72,04	13,31	72,05
30	14,37	78,11	13,70	74,42	12,94	68,97	12,72	68,52
40	14,18	77,06	13,32	72,19	12,46	65,73	12,12	64,86
50	13,94	75,69	12,90	69,75	11,70	61,27	11,20	59,30
60	13,76	74,67	12,54	67,61	11,12	56,60	10,50	55,10
80	13,37	72,42	11,77	63,12	9,80	49,09	8,92	45,54
100	13,05	70,62	11,12	59,31	8,68	42,42	7,64	37,81
120	12,68	68,49	10,50	55,66	7,51	34,63	6,33	29,89
150	12,19	65,73	9,58	50,28	5,84	25,68	4,77	20,46
180	11,74	63,14	8,66	44,89	4,77	19,72	3,95	15,50
210	11,23	60,23	7,74	39,50	3,88	15,15	3,35	11,85
240	10,81	57,84	6,93	34,78	3,44	12,73	3,10	10,37
270	10,44	57,73	6,24	30,74	3,16	11,58	2,99	9,67
300	9,97	53,06	5,53	26,58	3,07	11,05		
330	9,47	50,21	4,87	22,72				
360	9,05	47,85	4,38	19,83				
390	8,68	45,74	4,06	17,98				
420	8,24	43,21	3,70	15,87				
540	7,89	41,24	3,43	14,29				
480	7,50	39,02	3,25	13,21				
510	7,20	37,31	3,13	12,53				
540	6,78	34,89	3	11,77				
570	6,47	33,13						
600	6,22	31,70						
630	5,87	29,71						
660	5,66	28,54						
690	5,37	26,86						
720	5,12	25,47						
750	4,91	24,27						
780	4,71	23,11						
810	4,52	22,05						
840	4,35	21,06						

870	4,14	19,86
900	3,92	18,64
930	3,74	17,58
960	3,56	16,59
990	3,39	15,62
1020	3,22	14,65
1050	3,07	13,77

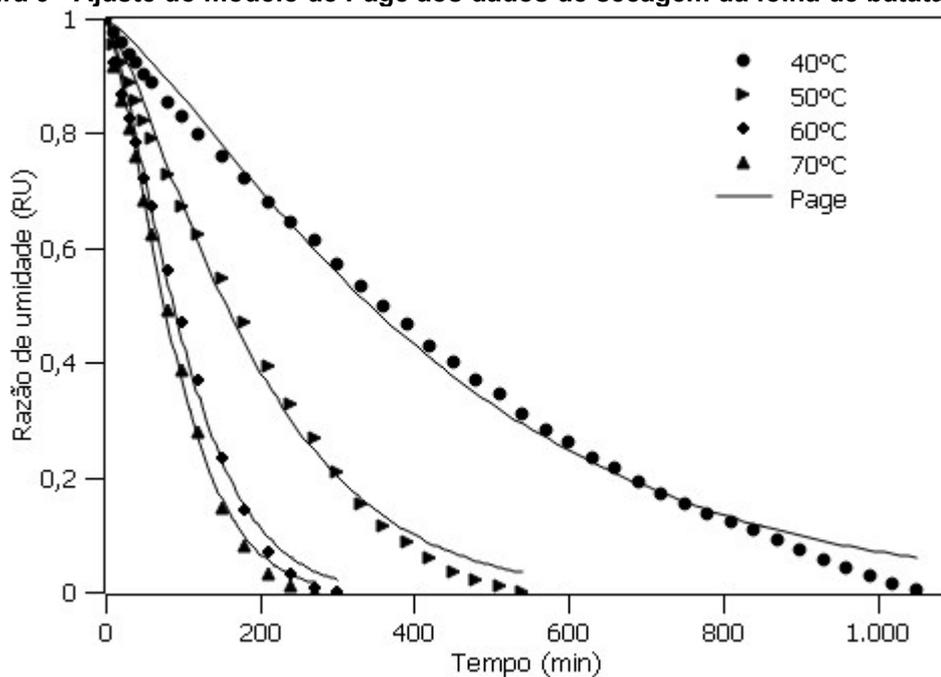
APÊNDICE B – Ajuste de modelos aos dados experimentais

Figura 8 - Ajuste do modelo de Lewis aos dados de secagem da folha de batata-doce



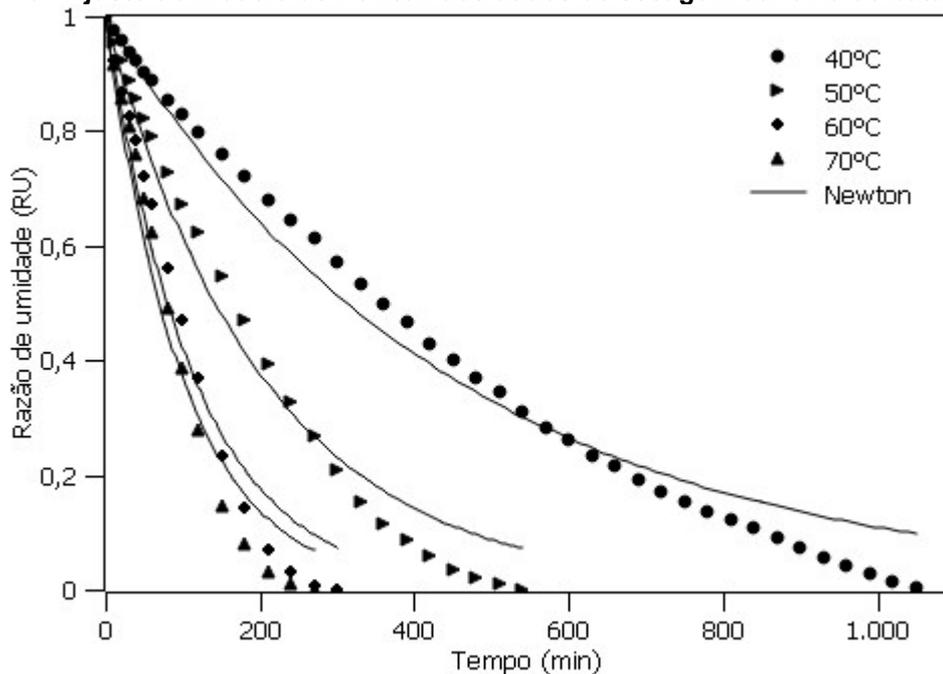
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 9 - Ajuste do modelo de Page aos dados de secagem da folha de batata-doce



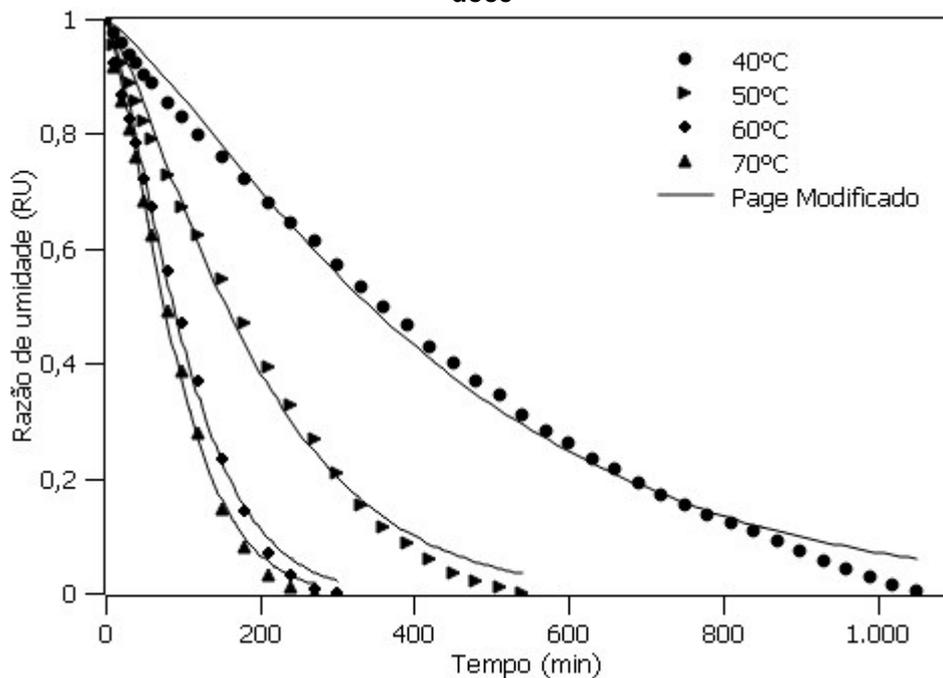
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 10 - Ajuste do modelo de Newton aos dados de secagem da folha de batata-doce



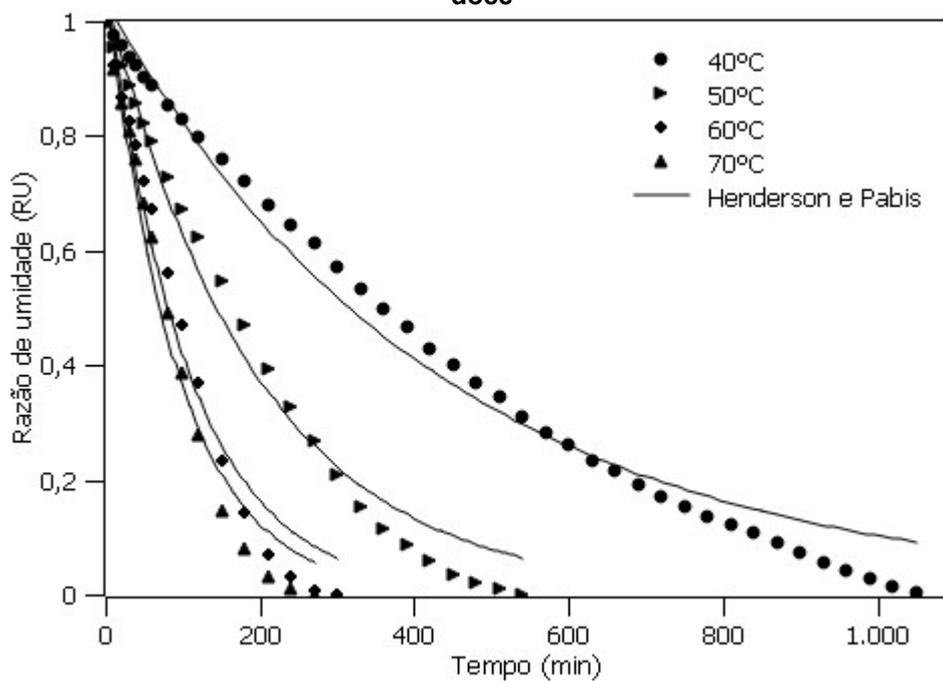
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 11 - Ajuste do modelo de Page Modificado aos dados de secagem da folha de batata-doce



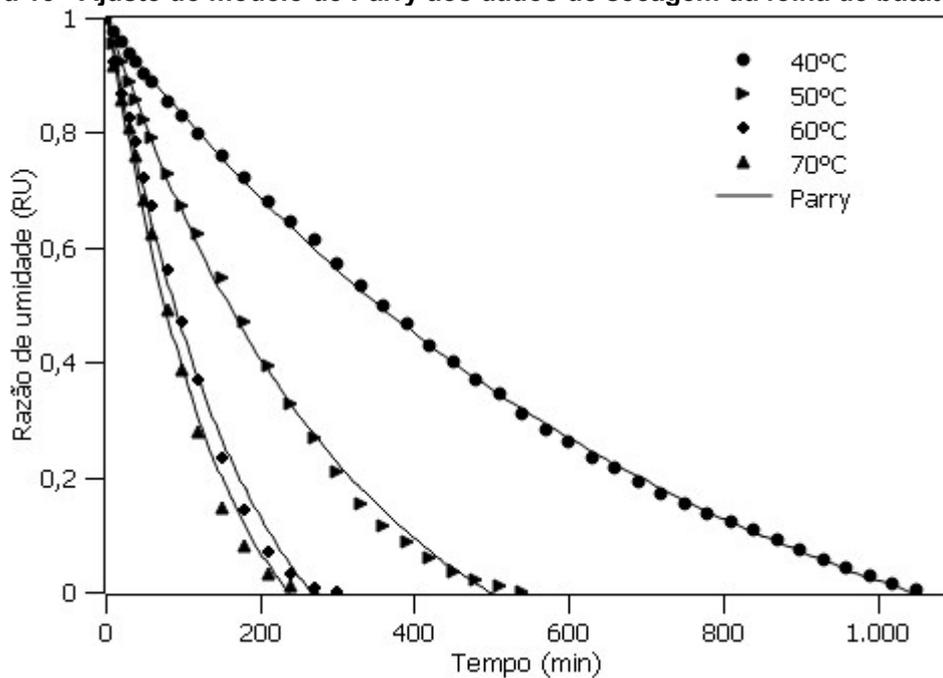
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 12 - Ajuste do modelo de Henderson e Pabis aos dados de secagem da folha de batata-doce



Fonte: Autoria própria (2021)

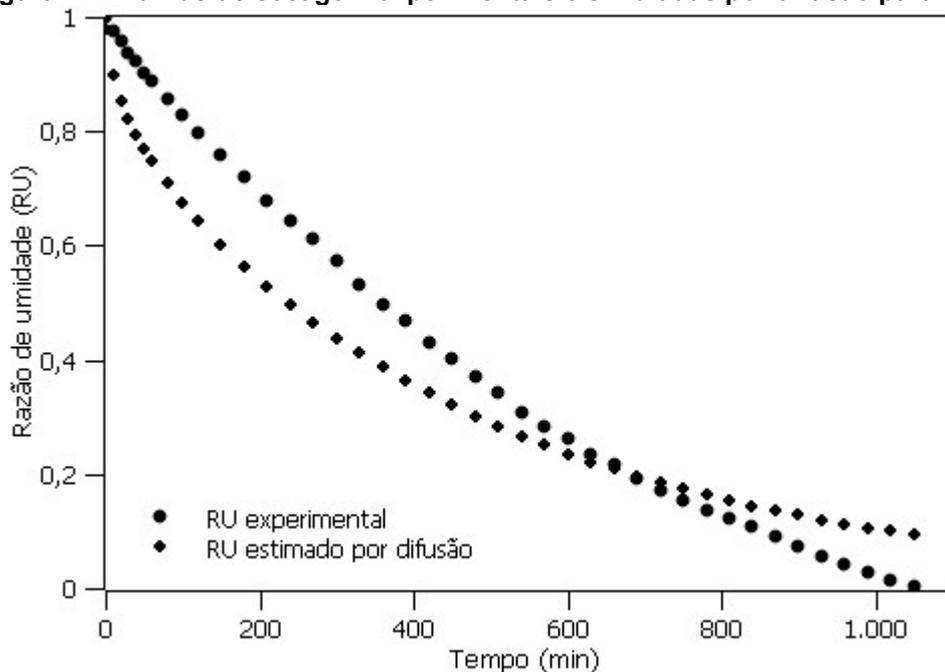
Figura 13 - Ajuste do modelo de Parry aos dados de secagem da folha de batata-doce



Fonte: Autoria própria (2021)

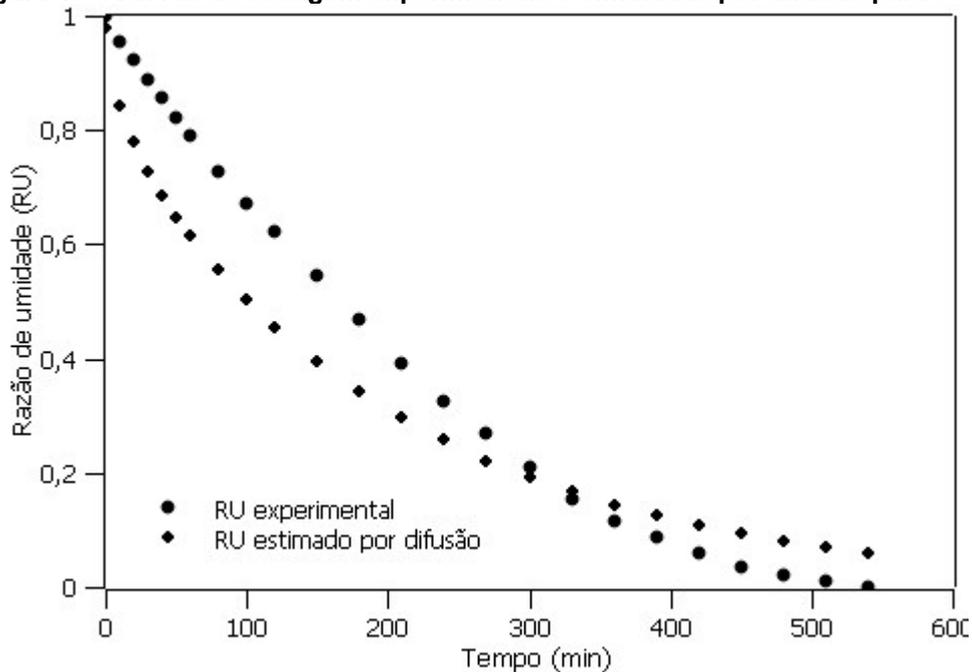
APÊNDICE C – Ajuste das curvas de secagem estimadas pelo modelo Difusivo às curvas de secagem experimentais

Figura 14 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 40°C



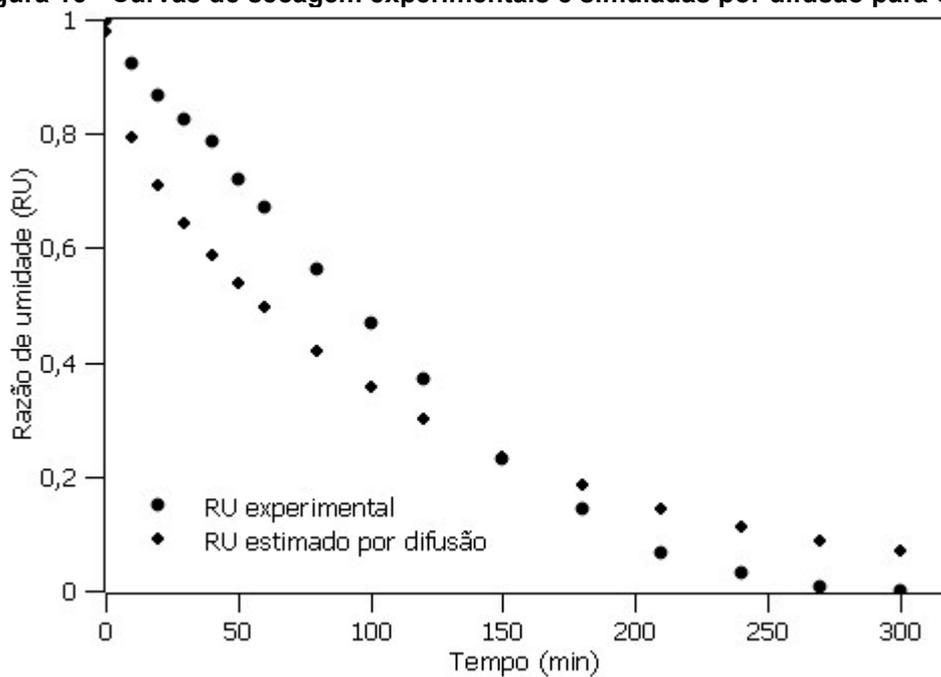
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 15 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 50°C



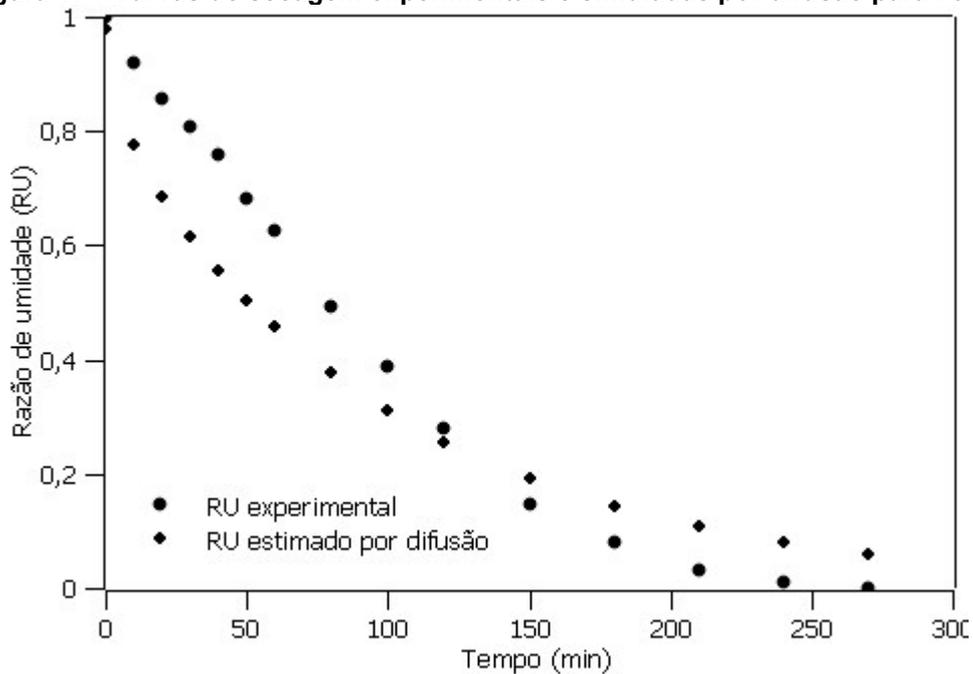
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 16 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 60°C



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 17 - Curvas de secagem experimentais e simuladas por difusão para 70°C



Fonte: Autoria própria (2021)