

Modelagem bayesiana utilizada na descrição da cinética de secagem de grãos de arroz

Natiele de A. Gonzaga^{1†}, Edilene Cristina P. Azarias¹, Rafaela de C. Salvador¹, Joel Augusto Muniz², Edilson Marcelino Silva³, Alessandra Q. da Silva⁴

¹ Doutorando em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras (UFLA).

² Docente do Departamento de Estatística, Universidade Federal de Lavras (UFLA).

³ Docente do Departamento de Matemática, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

⁴ Docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD).

Resumo: O arroz é um cereal amplamente consumido em todo o mundo, é um produto sazonal, o que justifica a necessidade de conservação e armazenamento. No contexto sul-americano, o Brasil destaca-se como o principal produtor. A prática da secagem é altamente benéfica, não apenas por minimizar as perdas pós-colheita, mas também por agregar valor adicional ao produto final. Os estudos geralmente empregam poucas observações, porém a inferência em modelos não lineares só é válida para amostras suficientemente grandes. Como a metodologia bayesiana tem se mostrado eficiente mesmo com pequenas amostras, o objetivo deste trabalho é analisar o ajuste de modelos de regressão não linear aos dados de cinética de secagem de grãos de arroz por meio da abordagem da inferência bayesiana. utilizando-se priors informativas e não informativas, assim como desenvolver as distribuições condicionais completas para os parâmetros dos modelos avaliados, foram geradas amostras de distribuições marginais a posteriori utilizando o amostrador de Gibbs e algoritmos Metropolis-Hastings implementadas no software R. Os modelos avaliados foram Henderson e Pabis e Exponencial Simples com Três Parâmetros, obtendo-se o diagnóstico de convergência, estimativas pontuais de média e intervalares (HPD), bem como critérios de seleção como os Critérios de informação Bayesiano (BIC) e Deviance (DIC), medida de Kullback-Leibler e Fator de Bayes. De acordo com esses critérios, pode-se concluir que modelo de Henderson e Pabis apresentou-se como o mais indicado para descrever a cinética de secagem de grãos de arroz.

Palavras-chave: Arroz; secagem; Modelos não lineares; Inferência Bayesiana; Regressão.

Bayesian modeling used to describe the drying kinetics of rice grains

Abstract: Rice is a cereal widely consumed throughout the world, it is a seasonal product, which justifies the need for conservation and storage. In the South American context, Brazil stands out as the main producer. The practice of drying is highly beneficial, not only for minimizing post-harvest losses, but also for adding additional value to the final product. Studies generally employ few observations, but inference in nonlinear models is only valid for sufficiently large samples. As the Bayesian methodology has proven to be efficient even with small samples, the objective of this work is to analyze the adjustment of nonlinear regression models to rice grain drying kinetics data using the Bayesian inference approach. using informative and non-informative priors, as well as developing complete conditional distributions for the parameters of the evaluated models, samples of posterior marginal distributions were generated using the Gibbs sampler and Metropolis-Hastings algorithms implemented in the R software. The evaluated models were Henderson and Pabis and Simple Exponential with Three Parameters, obtaining the convergence diagnosis, mean and interval point estimates (HPD), as well as selection criteria such as the Bayesian Information Criteria (BIC) and Deviance (DIC), measure of Kullback-Leibler and Bayes factor. According to these criteria, it can be concluded that the Henderson and Pabis model was the most suitable for describing the drying kinetics of rice grains.

Keywords: Rice; drying; Non-linear models; Bayesian Inference; Regression.

†Autor correspondente: natiele.gonzaga1@estudante.ufla.br

Manuscrito recebido em: 04/06/2024

Manuscrito revisado em: 20/09/2024

Manuscrito aceito em: 23/09/2024

Introdução

O arroz (*Oryza sativa*) é destacado como um dos cereais mais cultivados e consumidos no mundo, caracterizado como alimento básico para mais de três bilhões de pessoas; é o segundo cereal mais cultivado no mundo, superado apenas pelo milho, desempenha papel importante, tanto em nível econômico quanto social, para os povos das nações mais populosas do mundo; ao contrário de outros cereais, o arroz é consumido quase que exclusivamente por humanos, a produção total no Brasil, em 2022/2023, foi 10,7 milhões de toneladas, colhidas em 1,6 milhão de hectares, com produtividade média de 6.569 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2023).

Sendo o arroz um produto sazonal e de consumo constante, sua conservação e armazenamento tornam-se essenciais para atender à demanda durante o ano todo. Para isso, a secagem do alimento é fundamental, pois reduz o teor de umidade dos grãos, prevenindo os danos causados por microrganismos, como fungos e bactérias, e inibindo a ocorrência de reações químicas que poderiam comprometer a qualidade. Esse processo, além de prolongar a vida útil do alimento, assegura a estabilidade dos grãos durante o armazenamento, garantindo que suas características sensoriais sejam mantidas ao longo do tempo (NESS, 1998).

A secagem de forma natural é realizada em terreiros e ambientes similares, utilizando a ação dos ventos e a energia proveniente da radiação solar, direta ou indiretamente. A temperatura e a umidade dos grãos são controladas de maneira empírica, com base no conhecimento prático adquirido pelos agricultores ao longo de sua experiência na atividade (BORGES *et al.*, 2012; SANTOS; OLIVEIRA, 2013).

Os estudos normalmente são baseados em um número pequeno de observações. No entanto, a inferência em modelos de regressão não linear é considerada válida apenas para amostras suficientemente grandes (MARTINS FILHO *et al.*, 2008). Uma alternativa a ser considerada é a abordagem bayesiana, a qual possibilita a utilização de amostras pequenas, incorporando dados de estudos anteriores. Além disso, esse método proporciona uma distribuição de probabilidade para os parâmetros, bem como uma interpretação direta para o intervalo de credibilidade (GELMAN *et al.*, 2014).

A metodologia bayesiana é fundamentada no Teorema de Bayes, cujo desenvolvimento é baseado na probabilidade condicional, em que primeiramente é definida uma distribuição *a priori* $p(\theta)$, além de uma distribuição conjunta atualizada com base nas informações fornecidas pelos dados amostrais, conhecida como função de verossimilhança $p(Y|\theta)$, que ao serem combinadas pelo teorema de Bayes obtém-se a distribuição *a posteriori* de θ , $p(\theta|Y)$. (PEREIRA *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2023).

Esse tipo de inferência oferece várias vantagens e tem sido aplicado em diferentes áreas do conhecimento, principalmente devido ao progresso dos recursos computacionais, que permite a estimativa de modelos complexos com maior precisão. Apesar da existência de grande diversidade de pesquisas envolvendo grãos e sementes, na literatura não estão disponíveis trabalhos utilizando a inferência bayesiana no campo da cinética de secagem de alimentos, o uso dessa abordagem ainda é pouco explorado nesse campo.

Os modelos de regressão não linear são muito utilizados para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. Vários estudos já foram desenvolvidos para avaliar a secagem de diversos tipos de grãos e sementes: Lehn e Pinto (2004) ajustaram os modelos de regressão não linear de Lewis, Brooker, Henderson e Henderson, Page, Overhults para a secagem de arroz em casca, Santos e Oliveira (2013) ajustaram os modelos Aproximação da difusão, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis, Dois Termos, Midilli, Newton, Page e Page Modificada na

cinética de secagem de grãos de arroz-vermelho. Gonzaga *et al.* (2024b) utilizou os modelos de Lewis, Overhults, Page, Midilli e Exponencial simples com três parâmetros no estudo da cinética de secagem de sementes de feijão.

Ante o exposto, o objetivo deste trabalho foi utilizar o método bayesiano para avaliar os modelos de regressão não linear Henderson e Pabis e Exponencial Simples com Três Parâmetros aos dados de cinética de secagem de grãos de arroz, indicando o modelo mais adequado para descrever os dados. Além disso, estimou-se os intervalos de credibilidade dos parâmetros do modelo.

Materiais e Métodos

Os dados analisados foram extraídos de Lehn e Pinto (2004), foram utilizados grãos de arroz em casca da variedade “El Passo 144”(L- 144), no ano de 2002, provenientes da região Sul do Rio Grande do Sul. Foram selecionados grãos inteiros, íntegros e com casca. As amostras foram secas em silos de armazenagem metálicos possuindo capacidade de 270 kg cada. A etapa de secagem natural foi realizada no período de 70 dias.

A cinética de secagem de grãos de arroz foi descrita usando dois modelos de regressão não linear:

i) Modelo de Henderson e Pabis (HENDERSON; PABIS, 1961):

$$RU_i = k_0 e^{-kt_i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

ii) Modelo Exponencial Simples com Três Parâmetros (ERTKIN; YALDIZ, 2004):

$$RU_i = k_0 e^{-kt_i} + a + \varepsilon_i \quad (2)$$

Onde:

RU_i representa o valor médio da razão de umidade (adimensional) dos grãos de arroz no tempo i em dias;

k_0 corresponde à condição inicial do grão, sendo próximo ou igual a 1 por representar 100% da umidade inicial do grão;

k refere-se à taxa de secagem, com valores entre 0 e 1;

a é uma constante do modelo, não possui interpretação direta, representando uma variação adicional independente do tempo. Além disso, quando $a = 0$, o Modelo de Henderson e Pabis torna-se um caso particular do Modelo Exponencial simples com Três Parâmetros;

e é a base do logaritmo neperiano;

t_i tempo (dias) de análise da variável dependente para a medição da umidade no grão e

ε_i é o erro possuindo distribuição normal, com média zero e precisão $\tau = \frac{1}{\sigma^2}$.

A Verossimilhança dos modelos de Henderson e Pabis e Exponencial Simples com Três Parâmetros é dada pelas equações (3) e (4), respectivamente:

$$L(Y|k, k_0, \tau) \propto \tau^{\frac{n}{2}} \exp \left\{ -\frac{\tau}{2} \sum_{i=1}^n [y_i - k_0 e^{-kt_i}]^2 \right\} \quad (3)$$

$$L(Y|k, k_0, a, \tau) \propto \tau^{\frac{n}{2}} \exp \left\{ -\frac{\tau}{2} \sum_{i=1}^n [y_i - k_0 e^{-k t_i} - a]^2 \right\} \quad (4)$$

As distribuições *a priori* foram selecionadas com base no conhecimento sobre o processo de secagem, obtidas a partir do estudo da secagem de grãos de arroz por modelos de regressão via inferência frequentista de Lehn e Pinto (2004), ou ainda, de acordo com as características dos parâmetros. Quando faltava informações suficientes, foram empregadas distribuições *a priori* não informativas.

Foram estabelecidas *prioris* para os parâmetros dos modelos de Henderson e Pabis e Exponencial Simples com Três Parâmetros. As equações (5) - (8) a seguir, representam as distribuições *a priori* $p(k)$, $p(k_0)$, $p(a)$ e $p(\tau)$, com os hiperparâmetros representados por $Normal(\mu; \sigma^2)$, $Normal(\mu_0; \sigma_0^2)$, $Uniforme(a; b)$ e $Gama(\alpha; \beta)$.

$$p(k|\mu_k, \sigma_k) \propto \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_k^2} (k - \mu_k)^2 \right] \quad (5) \quad p(k_0|\mu_0, \sigma_0) \propto \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_0^2} (k_0 - \mu_0)^2 \right] \quad (6)$$

$$p(a) \propto \frac{1}{b-a}, I_{[0,1]} \quad (7) \quad p(\tau|\alpha, \beta) \propto \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \tau^{\alpha-1} e^{-\beta \cdot \tau} \quad (8)$$

Considerando as características dos parâmetros dos modelos de regressão não linear e as informações obtidas sobre o processo, k , k_0 e τ são as *prioris* informativas, para o parâmetro a foi usada *a priori* não informativa, sendo:

$$p(k) \sim N(0,125; 0,01); \quad p(k_0) \sim N(1; 0,05); \quad p(a) \sim U(0; 1) \quad \text{e} \quad p(\tau) \sim G(1,5; 1)$$

Todos os valores dos hiperparâmetros foram atribuídos por meio de uma metanálise considerando estudos de secagem de alimentos realizados por Furtado *et al.* (2019), Gonzaga *et al.* (2024a), Gonzaga *et al.* (2024b), Lehn e Pinto (2004) e Santos e Oliveira (2013).

Pelo Teorema de Bayes, a distribuição *a posteriori* conjunta é obtida multiplicando a verossimilhança pelas distribuições *a priori*. Para realizar a inferência de qualquer parâmetro do modelo, é necessário obter a distribuição marginal *a posteriori*. A distribuição *a posteriori* deve ser integrada em relação a todos os parâmetros do modelo. Como a integração da distribuição *a posteriori* conjunta pode ser complicada, requer o uso do amostrador de Gibbs e dos algoritmos Metropolis-Hastings (GELMAN *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2020).

A partir da distribuição *a posteriori* conjunta, obtém-se as distribuições posteriores condicionais completas. Utilizando as condicionais completas, amostras das distribuições *a posteriori* marginais (cadeia) foram geradas usando o amostrador de Gibbs e algoritmos Metropolis-Hastings, implementados no software R. A convergência da cadeia foi avaliada usando os critérios de Raftery e Lewis (1992) e Geweke (1992), que estão disponíveis no pacote Bayesian Output Analysis (boa) no software R.

Posteriormente, a estimação dos parâmetros dos modelos foi avaliada com base na precisão do ajuste fornecido, utilizando-se a medida de Kullback-Leibler (KL), sendo que quanto maior o valor da medida maior o ganho de informação e os Critérios de informação Bayesiano (BIC) e Deviance (DIC), elegendo como melhor modelo, aquele que apresentar os menores valores nesses critérios. Na comparação dos modelos, também foi utilizado o fator de Bayes, que segue um pro-

cesso análogo ao teste de razão de verossimilhança usado na inferência clássica. A interpretação do fator de Bayes (FB) é: se $FB > 1$, o modelo 1 (no numerador) é mais plausível que o modelo 2 (no denominador); caso contrário, se $FB < 1$, o modelo 2 é mais plausível que o modelo 1.

Resultados e Discussão

Partindo das distribuições conjuntas *a posteriori*, foram obtidas as distribuições condicionais completas para os parâmetros de cada modelo. A inferência sobre cada parâmetro do modelo foi realizada por meio das distribuições marginais de cada parâmetro. No modelo de Henderson e Pabis, utilizando o Teorema de Bayes, a distribuição *a posteriori* conjunta foi obtida multiplicando-se a verossimilhança (3) pelas distribuições *a priori* (5), (6) e (7). Assim, as distribuições condicionais completas *a posteriori* (9), (10) e (11) foram obtidas a partir da distribuição *a posteriori* conjunta do modelo de Henderson e Pabis, sendo:

$$k_0/k, \tau, \mu_0, \sigma_0^2 \sim N \left(\frac{\tau \sum_{i=1}^n (y_i e^{-kt_i}) + \frac{\mu_0}{\sigma_0^2}}{\tau \sum_{i=1}^n (e^{-kt_i}) + \frac{1}{\sigma_0^2}}, \frac{1}{\left(\tau \sum_{i=1}^n (e^{-kt_i}) + \frac{1}{\sigma_0^2} \right)} \right) \quad (9)$$

$$p(k/k_0, \tau, \mu_k, \sigma_k^2) \propto \exp \left\{ -\frac{\tau}{2} \sum_{i=1}^n [y_i - k_0 e^{-kt_i}]^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_k^2} [k - \mu_k]^2 \right\} \quad (10)$$

$$\tau/k, k_0, \alpha, \beta \sim G \left(\frac{n+2\alpha}{2}, \beta + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n [y_i^2 - 2y_i k_0 e^{-kt_i} + k_0^2 e^{-kt_i}] \right) \quad (11)$$

Para o modelo Exponencial Simples com Três Parâmetros, utilizando o Teorema de Bayes, a distribuição *a posteriori* conjunta foi obtida multiplicando-se a verossimilhança (4) pelas distribuições *a priori* (5), (6), (7) e (8). Desta forma, as distribuições condicionais completas *a posteriori* (12), (13), (14) e (15) foram obtidas a partir da distribuição *a posteriori* conjunta do modelo Exponencial Simples com Três Parâmetros, sendo:

$$k_0/k, \tau, a, \mu_0, \sigma_0^2 \sim N \left(\frac{\tau \sum_{i=1}^n (y_i e^{(-kt_i)} - e^{(-kt_i)} a) + \frac{\mu_0}{\sigma_0^2}}{\tau \sum_{i=1}^n (e^{(-kt_i)^2}) + \frac{1}{\sigma_0^2}}, \frac{1}{\left(\tau \sum_{i=1}^n (e^{(-kt_i)^2}) + \frac{1}{\sigma_0^2} \right)} \right) \quad (12)$$

$$p(k/k_0, \tau, a, \mu_k, \sigma_k^2) \propto \exp \left\{ -\frac{\tau}{2} \sum_{i=1}^n [y_i - k_0 e^{-kt_i} - a]^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_k^2} [k - \mu_k]^2 \right\} \quad (13)$$

$$a/k, k_0, \tau \sim N \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n \{y_i - k_0 e^{(-kt_i)}\} \right)}{(n-1)}, \frac{1}{\tau(n-1)} \right) \quad (14)$$

$$\tau/k, k_0, a, \alpha, \beta \sim G \left(\frac{n+2\alpha}{2}, \beta + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=2}^n (y_i^2 + k_0^2 e^{(-kt_i)^2} + a^2 - 2y_i k_0 e^{(-kt_i)} - 2y_i a + 2k_0 e^{(-kt_i)} a) \right) \quad (15)$$

A convergência das cadeias foi verificada pelos testes de Raftery e Lewis (1992) e Geweke (1992), para os modelos analisados. Na Tabela 1 podem ser vistos os resultados obtidos pelos testes nos dois modelos avaliados, percebe-se que pelo critério de Raftery e Lewis em todos os casos o Fator de Dependência (FD) foram abaixo de 5, obtendo-se resultados satisfatórios, visto que há convergência das cadeias sempre que os valores da estatística do teste (FD) forem inferiores a 5 (RAFTERY; LEWIS, 1992). Pelo teste de Geweke também há indícios de estacionariedade das cadeias, já que os valores-p foram não significativos ($p\text{-valor} > 0,05$), para todos os parâmetros e em ambos modelos.

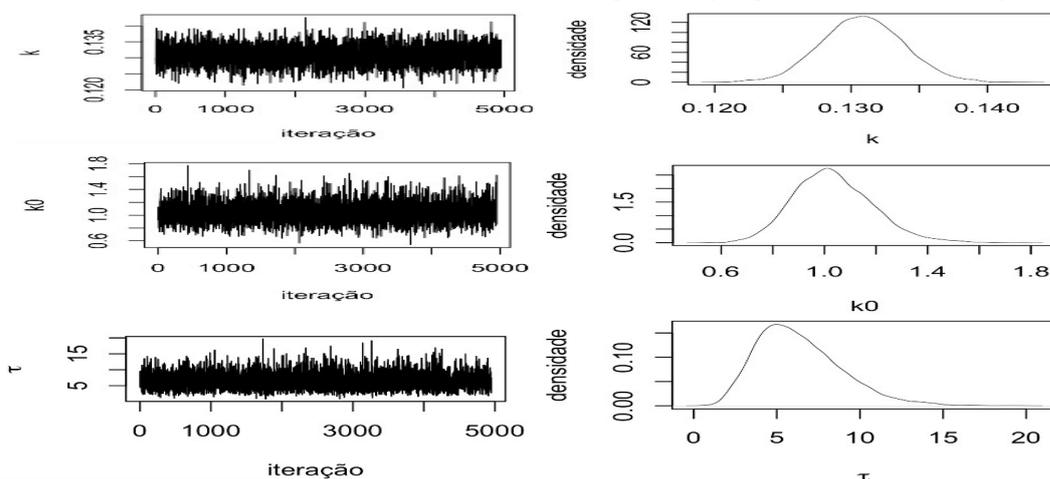
Table 1: Dependency Factor (DF) values for the Raftery and Lewis test and p-values for the Geweke test, regarding the convergence of the Henderson and Pabis model and the Simple Exponential model with three parameters for the drying kinetics data of rice grains.

Modelo	Parâmetro	Raftery e Lewis (FD)	Geweke
Henderson e Pabis	k	1,034	0,784
	k_0	0,984	0,532
	τ	1,034	0,560
Exponencial Simples com três parâmetros	k	1,017	0,527
	k_0	1,000	0,540
	a	0,984	0,479
	τ	1,017	0,545

Source: from the authors (2024).

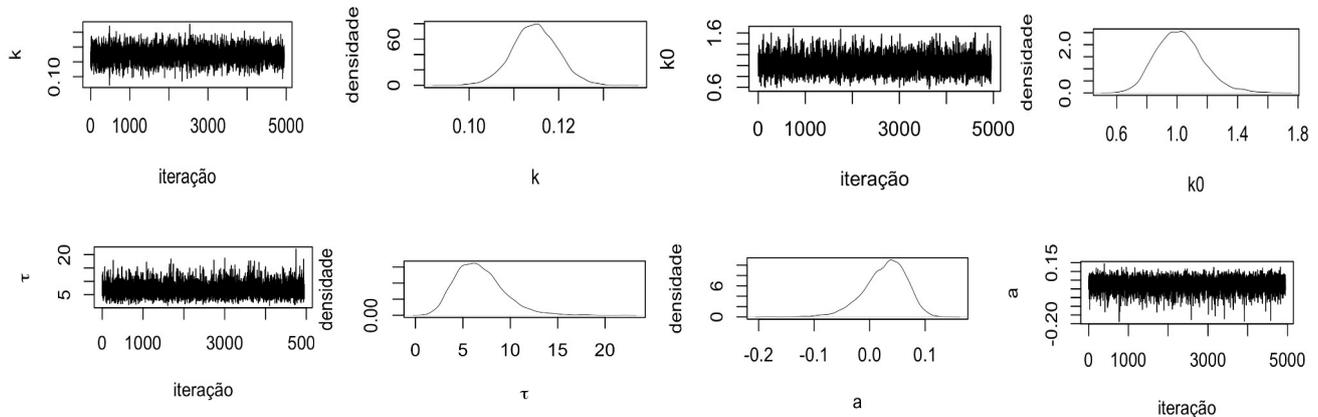
Nas Figuras 1 e 2 tem-se os traços das cadeias geradas e as densidades para os parâmetros dos modelos. Considerando o traço das cadeias geradas, percebe-se que de fato indicam a convergência das cadeias, com pequenas amplitudes e indicando estacionariedade das cadeias. Corroborando com os resultados obtidos para os testes apresentados na Tabela 1.

Figure 1: Trace of the MCMC chains and plot of the posterior densities generated for the Henderson and Pabis model, in relation to the rice grain drying kinetics data analysis



Source: from authors (2024).

Figure 2. Trace of the MCMC chains and plot of the posterior densities generated for the Simple Exponential model with three parameters, in relation to the data analysis algorithm for rice grain drying kinetics.



Source: from the authors (2024).

Na Tabela 2, apresentam-se as médias *a posteriori* e o intervalo de credibilidade (HPD) para cada parâmetro dos modelos para a análise dos dados de grãos de arroz.

Table 2: Estimates for the mode and mean of the parameters and their respective HPD intervals (LI and LS) for the Henderson and Pabis models and simple exponential model with three parameters related to the drying kinetics data of rice grains.

Modelo	Parâmetro	Média	HPD (LI)	HPD (LS)
Henderson e Pabis	k	0,129	0,124	0,135
	k_0	1,000	0,725	1,326
	τ	6,340	1,854	11,146
Exponencial Simples com três parâmetros	k	0,126	0,117	0,136
	k_0	1,017	0,743	1,313
	a	0,043	-0,029	0,110
	τ	6,655	2,236	11,561

Source: from the authors (2024).

De acordo com as estimativas do parâmetro k , tem-se que os valores da média ficaram entre 0 e 1, o que era esperado, pois são referentes à taxa de secagem do produto. Em relação ao parâmetro k_0 , nota-se que as estimativas foram próximas de 1, o que também é comum, uma vez que se referem a 100% da umidade inicial dos grãos de arroz, observa-se valores semelhantes para os dois modelos. A análise dos dados obtidos mostrou que os parâmetros dos modelos foram signifi-

ficativos, visto que os intervalos de credibilidade com 95% de probabilidade não incluíram zero, exceto para o parâmetro a do modelo Exponencial simples com três parâmetros, indicando que a adição do termo constante ao modelo não é necessária, pois retorna ao modelo de Henderson e Pabis.

Na Tabela 3, apresentam-se os avaliadores de qualidade de ajuste para os dois modelos.

Table 3: Quality fit assessors of the models.

Modelo	KL	BIC	DIC
Henderson e Pabis	6,012	22,326	27,920
Exponencial Simples com três parâmetros	5,106	31,664	50,352

Source: from the authors (2024).

Para selecionar o modelo que melhor se ajusta aos dados de cinética de secagem de grãos de arroz, considerou-se a medida de Kullback-Leibler (KL) e os critérios de Informação Bayesiano (BIC) e Deviance (DIC). Com base nos valores obtidos na tabela 3, tem-se que o modelo que melhor descreve os dados é o de Henderson e Pabis, pois apresenta menores valores de BIC e DIC, além disso, possui maior valor na medida de Kullback-Leibler, promovendo maior ganho de informação que o modelo Exponencial Simples com Três Parâmetros.

Na Tabela 4, está o resultado obtido da comparação dos modelos ajustados por meio do Fator de Bayes.

Table 4: Bayes Factor for the comparison of the Henderson and Pabis models and the Simple Exponential Model with Three Parameters.

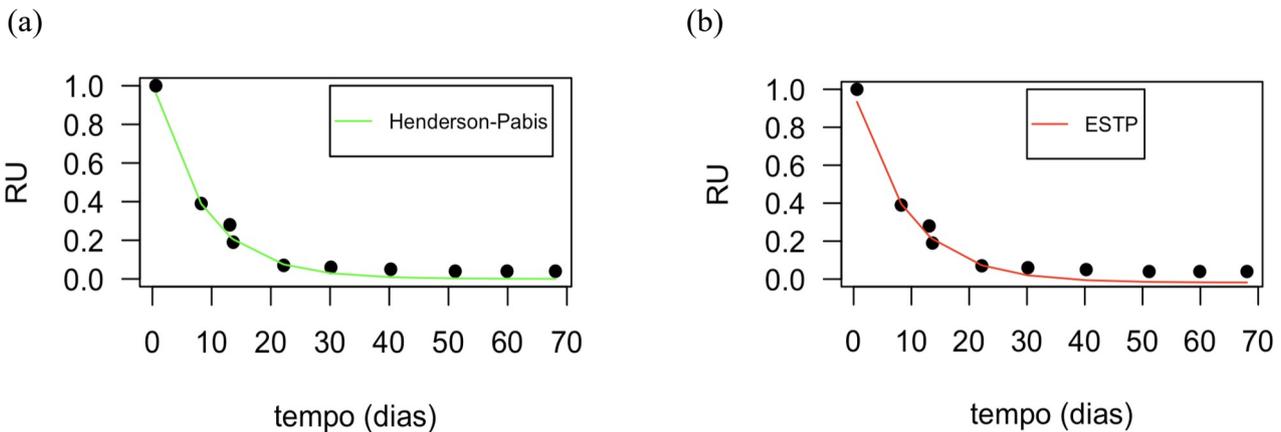
Modelo	FB
Henderson e Pabis	1,720
Exponencial Simples com Três Parâmetros	

Source: from the authors (2024).

Os resultados na Tabela 4 demonstram que o modelo de Henderson e Pabis é mais plausível que o modelo Exponencial simples com três parâmetros, visto que $FB > 1$. Portanto, mostra ser o mais adequado para descrever os dados de cinética de secagem de grãos de arroz, corroborando com os resultados apresentados por Lehn e Pinto (2004). Na análise da cinética de secagem de grãos de milho-pipoca, Gonzaga et al. (2024a) também concluíram que o modelo de Henderson e Pabis apresentou o melhor ajuste.

Na Figura 3(a), observa-se que o modelo de Henderson e Pabis apresentou curvas próximas aos valores experimentais, indicando um bom ajuste aos dados. No entanto, na Figura 3(b), a curva inicialmente se aproxima dos dados observados, mas se afasta conforme o tempo avança.

Figure 3: Curves of the fits of the Henderson and Pabis models and the Simple Exponential Model with three parameters to the drying kinetics data of rice grains in (a) and (b) respectively, with the Moisture Ratio (MR) as a function of Time (days).



Source: from the authors (2024).

Com base no modelo de Henderson e Pabis, tem-se que, a taxa de secagem foi em média de 0,129 g de água/dia, podendo variar de acordo com o HPD entre 0,124 g de água/min à 0,135 g de água por dia.

Conclusão

O método bayesiano foi eficiente para o estudo e o modelo de Henderson e Pabis foi o mais adequado para descrever a cinética de secagem de grãos de arroz, apresentando resultados satisfatórios e permitindo o ajuste de modelos simples e complexos com qualidade.

A modelagem na cinética de secagem permite otimizar as condições do processo, como temperatura, umidade e tempo de secagem, garantindo maior eficiência energética e redução de custos. Além disso, a modelagem da cinética de secagem não só melhora a eficiência do processo, mas também tem o potencial de influenciar políticas públicas ao promover práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzir o desperdício de recursos, e impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias. Isso cria uma conexão direta entre o avanço científico e a implementação de soluções práticas para a agricultura e a segurança alimentar.

Além dos modelos de Henderson e Pabis e do Exponencial Simples com 3 parâmetros, há vários outros que podem ser ajustados à cinética de secagem de grãos de arroz utilizando a metodologia de inferência bayesiana, como os modelos de Lewis, Page, Overhults, Dois Termos,

entre outros. Vale destacar que esse campo de estudo ainda pode ser expandido, incorporando modelos mais complexos e variáveis adicionais, o que contribui para um entendimento mais aprofundado da cinética de secagem de alimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Referências

- BORGES, S. R. S. et al. Proposição de um modelo para a cadeia produtiva do arroz vermelho na Paraíba. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.14, n.4, p.353-362, 2012.
- EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable *thin layer* drying model. **Journal of Food Engineering, Essex**, v.63, n.1, p.349-359, 2004.
- FURTADO, T. D. R. Utilização do método bayesiano na descrição da cinética de secagem da polpa de jaboticaba por modelos de regressão não linear. 123 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- GELMAN, A. *et al.* Bayesian Data Analysis (3rd ed.). London, UK; New York, US: Taylor & Francis Group, 2014.
- GEWEKE, J. Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments. N: BERNARDO, J. M.; BERGER, J. O.; DAWID, A. P.; SMITH, A. F. M. (Ed.). **Bayesian Statistics 4**. New York: Oxford University Press, 1992. p. 625-631.
- GONZAGA, N. A. *et al.* Descrição da cinética de secagem de grãos de milho-pipoca por modelos de regressão não linear. **Revista Foco**, 17(1), e4176, 2024a.
- GONZAGA, N. A. *et al.* Non-Linear Models With Autoregressive Error Structure for Studying Bean Seed Drying Kinetics. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e07886-e07886, 2024b.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v.6, n.3, p.169-174, 1961.

LEHN, D.N.; PINTO, L. A. A. Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem. 2004.

Martins Filho, S. *et al.* Bayesian approach in the growth curves of two cultivars of common bean. **Ciência Rural**, 38(6), 1516-1521. DOI: 10.1590/S0103- 84782008000600004, 2008.

NESS, A. R. R. Qualidade do arroz em casca, seco e armazenado em silos metálicos com aeração controlada, 1998, 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Fundação Universidade Federal de Rio Grande – Rio Grande, RS.

RAFTERY, A. E.; LEWIS, S. Comment: One long run with diagnostics implementation strategies for markov chain monte carlo. **Statistical Science**, Hayward, v. 7, n. 4, p. 493-497, 1992.

PEREIRA, A. A. *et al* Bayesian modeling of the coffee tree growth curve. **Ciência Rural**, v. 52, p. e20210275, 2022.

SANTOS, D.C; DE OLIVEIRA, E.N.A. Cinética de secagem de grãos de arroz-vermelho. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 11, p. 35-43, 2013.

SILVA, S. V. C. *et al.* Modelagem bayesiana da precipitação máxima de Petrópolis (RJ) e Poços de Caldas (MG). **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 28, p.e20210342, 2023.

SILVA, E. M. *et al.* Bayesian approach to the zinc extraction curve of soil with sewage sludge. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 42, 2020.

SILVA, E. M. *et al.* Stanford & Smith nonlinear model in the description of CO₂ evolved from soil treated with swine manure: maximum entropy prior. **Acta Scientiarum-Technology**, v. 45, p. e56360, 2022.