



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



DISSERTAÇÃO

**INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO COMESTÍVEL NA INCORPORAÇÃO
DO *Lactobacillus salivarius* EM MAMÃO DESIDRATADO**

SHÊNIA SANTOS MONTEIRO

**CAMPINA GRANDE – PB
FEVEREIRO - 2021**

SHÊNIA SANTOS MONTEIRO

**INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO COMESTÍVEL NA INCORPORAÇÃO
DO *Lactobacillus salivarius* EM MAMÃO DESIDRATADO**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO - 2021

M775i Monteiro, Shênia Santos.
Influência do revestimento comestível na incorporação do
Lactobacillus salivarius em mamão desidratado / Shênia Santos Monteiro.
- Campina Grande, 2021.
163 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais,
2021.
"Orientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva".
Referências.

1. Carica Papaya. 2. Probiótico. 3. Revestimento Comestível. 4.
Secagem Convectiva. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Título.

CDU 634.651(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

SHÊNIA SANTOS MONTEIRO

INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO COMESTÍVEL
NA INCORPORAÇÃO DO *LACTOBACILLUS*
SALIVARIUS EM MAMÃO DESIDRATADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 26/02/2021

Wilton Pereira da Silva – Orientador – UAF/CCT/UFCG

Josivanda Palmeira Gomes – Examinadora Interna - UAEA/CTRN/UFCG

Inacia dos Santos Moreira - Examinadora Externa - UFCG

Cleide Maria Pereira da Silva e Silva - Examinadora Externa - UAF/CCT/UFCG



Documento assinado eletronicamente por **WILTON PEREIRA DA SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 01/03/2021, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CLEIDE MARIA DINIZ PEREIRA DA SILVA E SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 01/03/2021, às 15:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

Documento assinado eletronicamente por **JOSIVANDA PALMEIRA GOMES, PROFESSOR 3 GRAU**, em 01/03/2021, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria](#)



[SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.](#)



Documento assinado eletronicamente por **INACIA DOS SANTOS MOREIRA, Usuário Externo**, em 02/03/2021, às 07:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1300029** e o código CRC **81BA96B7**.

Dedicatória

*Aos meus pais e em memória a minha
querida avó Maria do Carmo Cordeiro
Monteiro.*

AGRADECIMENTO

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela experiência proporcionada durante os anos vinculada à instituição.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA).

Aos professores que passaram pela minha história e escreveram capítulos importantes na minha vida.

Agradeço em especial ao Professor Wilton Pereira da Silva, pela orientação e generosidade em compartilhar seus conhecimentos comigo e juntos construímos esse trabalho.

A Professora Dra. Josivanda Palmeira Gomes, pelo apoio, confiança e conhecimentos compartilhados.

A Prof. Dra. Cleide Silva e a Dra. Inácia Moreira pelas contribuições realizadas.

Ao Emmanuel Pereira Moreira, pela generosidade, confiança e apoio dedicado ao meu trabalho.

A Renata Duarte, pelo carinho e apoio para comigo.

As amigas construídas nessa caminhada no ensino superior.

Aos amigos com os quais compartilhei sorrisos e angústias, que me inspiraram para o bem.

Agradeço, aos momentos de trocas de conhecimentos com os amigos (as): Eudeson Paiva, Newton Santos, Sâmela Barros e Ana Júlia Araújo, dos quais guardo um grande carinho.

Aos servidores da Universidade Federal de Campina Grande, que serviram e plantaram coisas boas para com aqueles que precisam de seus cuidados.

Aos meus familiares pela confiança e apoio.

A Deus pela sabedoria para ressignificar atitudes, palavras e olhares maldosos, e transformá-los em experiências de crescimento pessoal.

*“Passarei por este caminho uma só vez;
por isso, se existir qualquer bem ou gesto
de bondade que eu possa fazer em
benefício do ser humano, que eu faça já.
Que eu não o adie ou negligencie, pois
por aqui jamais passarei”.*

(Desconhecido)

RESUMO

As bactérias lácticas com potencial probiótico, têm despertado o interesse da indústria no sentido do desenvolvimento de produtos alimentícios com propriedades funcionais. No entanto, a incorporação de bactérias probióticas em alimentos é um desafio para a indústria, diante da sensibilidade das culturas probióticas às condições de processo. Portanto, objetivou-se neste trabalho avaliar o crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica e testar modelos matemáticos para determinar parâmetros de significado biológico e revestir fatias de mamão com a solução filmogênica probiótica para obter fatias probióticas de mamão desidratadas. O crescimento do *L. salivarius* nas soluções filmogênicas foi analisado quanto à influência das concentrações de gelatina (1-3%) e inulina (4-6%), fermentado sob o efeito de diferentes temperaturas (25-45 °C), por meio do planejamento fatorial completo 2³ com três repetições no ponto central. A solução filmogênica probiótica foi aplicada como revestimento comestível nas fatias de mamão antes da operação de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. O efeito da aplicação do revestimento probiótico foi avaliado na eficiência da secagem e qualidades físicas e físico-químicas, comparado à amostras controle. Os impactos das condições de processo no desenvolvimento celular são fundamentais para otimizar e tornar o processo aplicável pela indústria e, neste estudo, mostrou-se que as condições ótimas para o desenvolvimento das células probiótica nas soluções filmogênicas foram obtidas usando 1,0% de gelatina combinado com 4,0% de inulina, fermentado a 45 °C. A produção de células do *L. salivarius* e o consumo de substrato durante a fermentação da solução filmogênica foram bem simuladas por um modelo proposto neste trabalho, com coeficientes de determinação (R²) de 0,981 (crescimento celular) e de 0,991 (consumo de substrato). O modelo de Page descreveu adequadamente a cinética de secagem das fatias de mamão revestidas e controle, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, com R² superiores a 0,9988. O uso da solução filmogênica para incorporação do probiótico nas fatias de mamão apresentou resultados satisfatórios, com redução de 1,30 LogUFC g⁻¹ ao fim da secagem na temperatura de 70 °C. A aplicação do revestimento probiótico reduziu o encolhimento das fatias durante o processo, resultando na maior conservação da estrutura das fatias e conservação dos compostos fenólicos.

Palavras-chave: *Carica papaya*, probiótico, secagem convectiva

ABSTRACT

Lactic acid bacteria with probiotic potential have sparked industry interest in the development of food products with functional properties. However, the incorporation of probiotic bacteria in food is a challenge for the industry, given the sensitivity of probiotic cultures to process conditions. Therefore, the objective of this work is to evaluate the growth of *Lactobacillus salivarius* in the filmogenic solution and to test mathematical models to determine parameters of biological significance and to coat slices of papaya with the probiotic filmogenic solution to obtain probiotic slices of dehydrated papaya. The growth of *L. salivarius* in filmogenic solutions was analyzed for the influence of gelatin (1-3%) and inulin (4-6%) concentrations, fermented under different temperatures (25-45 °C), using complete factorial design 2³ with three repetitions at the central point. The probiotic film-forming solution was applied as an edible coating on the papaya slices before the drying operation at temperatures of 50, 60 and 70 °C. The effect of applying the probiotic coating was evaluated on drying efficiency and physical and physico-chemical qualities, compared to control samples. The impacts of process conditions on cell development are fundamental to optimize and make the process applicable by the industry and, in this study, it was shown that the optimal conditions for the development of probiotic cells in filmogenic solutions were obtained using 1.0% gelatin combined with 4.0% inulin, fermented at 45 °C. The production of *L. salivarius* cells and the consumption of substrate during the fermentation of the filmogenic solution were well simulated by a model proposed in this work, with determination coefficients (R²) of 0.981 (cell growth) and 0.991 (substrate consumption). The Page model adequately described the drying kinetics of the coated and controlled papaya slices, at temperatures of 50, 60 and 70 °C, with a R² greater than 0.9988. The use of the filmogenic solution to incorporate the probiotic in the papaya slices showed satisfactory results, with a reduction of 1.30 LogCFU g⁻¹ at the end of drying at a temperature of 70 °C. The application of the probiotic coating reduced the shrinkage of the slices during the process, resulting in greater conservation of the slice structure and conservation of phenolic compounds.

Keywords: *Carica papaya*, probiotic, convective drying

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Curva de secagem típica em condições constantes de secagem. 45
- Figura 2.** Aspecto visual dos frutos de mamão. 47
- Figura 3.** Superfícies de resposta aos efeitos da temperatura na concentração máxima de células em relação a: (a) concentração de gelatina; (b) concentração de inulina. 66
- Figura 4.** Superfícies de resposta aos efeitos da temperatura na taxa máxima de crescimento celular em relação a: (a) concentração de gelatina; (b) concentração de inulina. 69
- Figura 5.** Superfícies de resposta aos efeitos da concentração de gelatina no rendimento celular em relação a: (a) inulina; (b) temperatura. 70
- Figura 6.** Superfícies de resposta aos efeitos da concentração de gelatina e inulina em relação a: (a) sólidos solúveis totais; (b) açúcares redutores. 71
- Figura 7.** Curva de crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica representada pelo do modelo proposto. 78
- Figura 8.** Valores de $A(t)$ em LogUFC mL^{-1} e a correspondente incerteza (com 95,4% de confiança) para vários instantes, dados em horas. A parte destacada mostra valores de $A(t)$ estatisticamente equivalentes, o que ocorre a partir de 4 h. 80
- Figura 9.** Curva de consumo de substrato durante a fermentação com *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica com ajuste do modelo proposto. 83
- Figura 10.** Valores de $AR(t)$ em percentual e a correspondente incerteza (com 95,4% de confiança) para vários instantes, dados em horas. A parte destacada mostra valores de $A(t)$ estatisticamente equivalentes, o que ocorre a partir de 4 h. 83
- Figura 11.** Concentração de células viáveis do *Lactobacillus salivarius* durante do processo de secagem das fatias de mamão nas temperaturas de 50, 60 70 °C. A linha contínua representa a função de ajuste. 85

Figura 12. Cinética de secagem das fatias de mamão descritas pelo ajuste do modelo de Page nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	93
Figura 13. Encolhimento das fatias de mamão durante secagem nas temperaturas: (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C. A linha contínua representa a função de ajuste.	101
Figura 14. Aspecto visual da cor das fatias de mamão com o tempo de secagem em diferentes temperaturas.....	102
Figura 15. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem na reidratação das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $4,6016-0,7849\times T+0,3525\times T^2$ e probiótico = $5,0345-1,0406\times T+0,3271\times T^2$	109
Figura 16. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nas densidades aparente e sólida das fatias de mamão, com ajuste das equações: densidade aparente = $0,0055 - 0,0004\times T$ e densidade sólida = $0,0064 - 0,0005\times T$	110
Figura 17. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem na porosidade das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $9,61 + 2,93\times T - 1,12\times T^2$ e probiótico = $12,63 - 0,55\times T - 0,07\times T^2$	111
Figura 18. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nos compostos fenólicos das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $140,54 - 46,23\times T + 9,50\times T^2$ e probiótico = $51,65 + 32,88\times T - 6,06\times T^2$	114
Figura 19. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nos flavonoides das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $12,11 - 2,29\times T + 0,21\times T^2$ e probiótico = $9,16 - 2,20\times T + 0,27\times T^2$, e antocianinas: controle = $1,29 - 0,01\times T + 0,02\times T^2$ e Probiótico = $0,70 - 0,03\times T - 0,02\times T^2$	115
Figura 20. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nos carotenoides das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $0,44 - 0,09\times T + 0,09\times T^2$ e probiótico = $0,33 - 0,05\times T + 0,01\times T^2$	116

Figura 21. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem na clorofila total das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $0,26 + 0,97 \times T - 0,33 \times T^2$ e probiótico = $0,35 - 0,13 \times T + 0,02 \times T^2$ 117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Matriz do planejamento experimental completo 2^3 com três repetições no ponto central com valores reais das variáveis independentes.....	48
Tabela 2. Esquema fatorial 2×3 para análise das condições de processo: tratamento e temperatura de secagem.....	54
Tabela 3. Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem das fatias de mamão.....	56
Tabela 4. Características biológicas e físico-químicas das soluções filmogênicas fermentadas com <i>Lactobacillus salivarius</i> , após 4 horas de fermentação...	67
Tabela 5. Parâmetros dos modelos para o processo de crescimento celular na solução filmogênica.	75
Tabela 6. Parâmetros do modelo proposto para o processo de crescimento celular na solução filmogênica.....	79
Tabela 7. Parâmetros e desvio padrão dos modelos para o processo consumo de substrato na solução filmogênica.....	82
Tabela 8. Concentração de células viáveis do <i>Lactobacillus salivarius</i> nas fatias de mamão <i>in natura</i> e secas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	84
Tabela 9. Parâmetros estimados e desvio padrão dos modelos matemáticos ajustados os experimentos de secagem das fatias de mamão.....	88
Tabela 10. Tempo de secagem e teor de água das fatias de mamão.....	94
Tabela 11. Difusividade efetiva com condição de primeiro e terceiro tipo e indicadores estatísticos (R^2 e χ^2).	96
Tabela 12. Propriedades termodinâmicas das fatias de mamão desidratadas.....	98
Tabela 13. Parâmetros de cor das fatias de mamão <i>in natura</i> e desidratadas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	104

Tabela 14. Perfil de textura das fatias de mamão secas.....	106
Tabela 15. Propriedades físicas das fatias de mamão nas diferentes condições do processo.	108
Tabela 16. Características físico-químicas das fatias de mamão <i>in natura</i> e secas nas diferentes condições de processo.....	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1)	Rendimento celular	49
Equação (2)	Taxa máxima de crescimento	49
Equação (3)	Tempo de geração	49
Equação (4)	Modelo de Baranyi.....	50
Equação (5)	Função F(t) do modelo de Baranyi	50
Equação (6)	Modelo de Gompertz	51
Equação (7)	Modelo de Gompertz generalizado.....	51
Equação (8)	Modelo Logistic	51
Equação (9)	Modelo Logistic Modificado	51
Equação (10)	Modelo Weibull	52
Equação (11)	Fator de viés	52
Equação (12)	Fator de precisão	52
Equação (13)	Razão do teor de água	54
Equação (14)	Concentração de células	55
Equação (15)	Modelo de Handerson e Pabis	56
Equação (16)	Modelo de Peleg	56
Equação (17)	Modelo de Page	56
Equação (18)	Modelo de Silva et alii	56
Equação (19)	Modelo de Wang e Singh	56
Equação (20)	Distribuição da temperatura sobre a superfície do corpo	56

Equação (21) Solução analítica do primeiro tipo	57
Equação (22) Solução analítica do terceiro tipo	57
Equação (23) Coeficiente B_n	57
Equação (24) Número de Biot	58
Equação (25) Equação característica para parede infinita	58
Equação (26) Equação de Arrhenius	58
Equação (27) Entalpia	58
Equação (28) Entropia	59
Equação (29) Energia livre de Gibbs	59
Equação (30) Equação de Arrhenius linearizada	59
Equação (31) Contração do volume a granel	59
Equação (32) Diferença de cor total	60
Equação (33) Taxa de reidratação	60
Equação (34) Volume de amostra	61
Equação (35) Densidade aparente	61
Equação (36) Densidade sólida	61
Equação (37) Porosidade	62
Equação (38) Flavonoides	63
Equação (39) Antocianinas	63
Equação (40) Efeito da temperatura na concentração de células na solução filmogênica	68

Equação (41) Efeito da temperatura na taxa máxima de crescimento do <i>Lactobacillus salivarius</i> na solução filmogênica	68
Equação (42) Efeito da concentração de gelatina no rendimento celular na solução filmogênica	70
Equação (43) Efeito das concentrações de gelatina e inulina no teor de sólidos solúveis na solução filmogênica	72
Equação (44) Efeito das concentrações de gelatina e inulina no teor de açúcares redutores na solução filmogênica	72
Equação (45) Modelo proposto	77
Equação (46) Matriz de covariância para o crescimento celular	80
Equação (47) Equação de propagação de erros	80
Equação (48) Matriz de covariância para o consumo de substrato	83
Equação (49) Viabilidade das células com o tempo de secagem na temperatura de 50 °C	85
Equação (50) Viabilidade das células com o tempo de secagem na temperatura de 60 °C	85
Equação (51) Viabilidade das células com o tempo de secagem na temperatura de 70 °C	85
Equação (52) Taxa de encolhimento das fatias de mamão controle com o tempo de secagem na temperatura de 50 °C	100
Equação (53) Taxa de encolhimento das fatias de mamão probiótico com o tempo de secagem na temperatura de 50 °C.....	100
Equação (54) Taxa de encolhimento das fatias de mamão controle com o tempo de secagem na temperatura de 60 °C.....	100
Equação (55) Taxa de encolhimento das fatias de mamão probiótico com o tempo de secagem na temperatura de 60 °C	100

Equação (56) Taxa de encolhimento das fatias de mamão controle com o tempo de secagem na temperatura de 70 °C 100

Equação (57) Taxa de encolhimento das fatias de mamão probiótico com o tempo de secagem na temperatura de 70 °C 100

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro dos modelos matemáticos para a cinética de secagem (adimensional)
A_0	Concentração mínima de células (LogUFC mL ⁻¹) ou substrato (%)
Abs	Valor da absorbância
A_m	Concentração máxima de células (LogUFC mL ⁻¹) ou substrato (%)
AR	Açúcares redutores (%)
A(t)	Concentração de células (LogUFC mL ⁻¹) ou substrato (%) no tempo t
aw	Atividade de água
b	Parâmetro dos modelos matemáticos para a cinética de secagem
B_i	Número de Biot (adimensional)
B_n	Coefficiente da solução analítica do terceiro tipo para a equação de difusão
d	Fator de diluição
D	Difusividade efetiva (m ² s ⁻¹)
D_0	Fator pré-exponencial
E_a	Energia de Ativação (J mol ⁻¹)
FP	Fator de precisão (adimensional)
FV	Fator de viés (adimensional)
F(t)	Função do modelo de Baranyi
G	Concentração de gelatina (%)
h	Coefficiente convectivo de transferência de massa (m ² s ⁻¹)
h_0	Parâmetro que indica o estado biológico ($\mu_{max} \lambda$)
h_b	Constante de Planck (J s ⁻¹)
I	Tempo no qual a taxa de crescimento ou consumo de substrato é máxima (h)
In	Concentração de inulina (%)
k_1	Taxa na qual a variável de resposta se aproxima do seu potencial máximo (h ⁻¹)
k_b	Constante de Boltzmann (J K ⁻¹)
L	Espessura da amostra (mm)
M	Massa do solvente (g)
M_f	Massa do frasco (g)
M_{t+s}	Massa do frasco mais amostra e solvente (g)
MRS	Man, Rogosa e Sharpe

n	Número total de dados experimentais
N_{Cel}	Concentração de células (LogUFC mL ⁻¹)
N	Número de células contadas
P	Profundidade da câmara (mm)
R	Constante universal dos gases ideais (J molK ⁻¹)
R ²	Coefficiente de determinação (adimensional)
S_c	Área da superfície contada (mm ²)
S_f	Concentração de substrato ao fim da fase exponencial (%)
S_i	Concentração de substrato no início da fase exponencial (%)
SS	Sólidos solúveis (°Brix)
T	Temperatura (°C)
t	Tempo (h)
T_a	Temperatura da amostra (°C)
t_i	Tempo do início da fase exponencial (h)
t_f	Tempo do fim da fase exponencial (h)
t_g	Tempo de geração (h)
TR	Taxa de reidratação (g g ⁻¹)
T_s	Temperatura da superfície do corpo (°C)
TPA	Análise do perfil de textura
T_{50°	Concentração de células durante secagem na temperatura de 50 °C
T_{60°	Concentração de células durante secagem na temperatura de 60 °C
T_{70°	Concentração de células durante secagem na temperatura de 70 °C
v	Taxa máxima do consumo do substrato limitante (h ⁻¹)
V	Volume da amostra (cm ³)
V_0	Volume inicial (mm ³)
V_f	Volume do frasco (cm ³)
v_p	Viabilidade do probiótico (LogUFC mL ⁻¹)
V_t	Volume instantâneo (mm ³)
W_1	Massa da amostra seca (g)
W_2	Massa da amostra reidratada (g)
X	Concentração de células no fim da fase exponencial (LogUFC mL ⁻¹)
X_{amostra}	Teor de água da amostra (g g ⁻¹)
X^*	Teor de água em base seca (g g ⁻¹)

X_0	Teor de água inicial em base seca (g g^{-1})
X_e	Teor de água de equilíbrio em base seca (g g^{-1})
X_i	Concentração de células no início da fase exponencial (LogUFC mL^{-1})
$X(t)$	Teor de água em função do tempo de secagem
$Y_{x/s}$	Rendimento celular ($\text{LogUFC mL}^{-1} \text{g}^{-1}$)
ε	Porosidade (%)
ξ_v	Contração do volume a granel (mm^3)
ρ_a	Densidade aparente (g cm^{-3})
ρ_s	Densidade sólida (g cm^{-3})
ρ_w	Densidade da água (g cm^{-3})
$\rho_{solvente}$	Densidades do solvente (g cm^{-3})
δ_1	Constante alométrica (adimensional)
λ	Tempo de duração da fase lag (h)
μ, μ_n	Raízes da equação característica para parede infinita
μ_{\max}	Taxa máxima de crescimento (h^{-1})
χ^2	Qui-quadrado (adimensional)
ΔH	Entalpia (J mol^{-1})
ΔS	Entropia (J mol^{-1})
ΔG	Energia livre de Gibbs (J mol^{-1})

LISTA DE ANEXO

ANEXO I.	ARTIGO PUBLICADO	145
-----------------	-------------------------------	------------

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
2.	OBJETIVOS	27
2.1.	Objetivo geral	27
2.2.	Objetivos específicos	27
3.	REVISÃO DE LITERATURA	28
3.1.	Mamão	28
3.2.	Filme e revestimento comestível	29
3.2.1.	Gelatina.....	32
3.2.2.	Inulina	34
3.3.	Filme e revestimento comestível como veículo para probióticos.....	34
3.4.	Probióticos	36
3.4.1.	<i>Lactobacillus salivarius</i>	38
3.5.	Filme e revestimentos comestíveis como pré-tratamento à secagem	39
3.6.	Secagem.....	40
3.7.	Frutas secas probióticas	41
3.8.	Modelagem matemática.....	42
3.8.1.	Modelos matemáticos na microbiologia.....	42
3.8.2.	Modelos matemáticos na secagem de alimentos	44
4.	MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1.	Obtenção da matéria-prima.....	47
4.2.	Elaboração da solução filmogênica probiótica	47
4.2.1.	Parâmetros cinéticos	49
4.2.2.	Modelos matemáticos: crescimento celular e consumo de substrato	50
4.2.2.1.	Modelo de Baranyi	50
4.2.2.2.	Modelo de Gompertz	51
4.2.2.3.	Modelo de Gompertz Generalizado.....	51
4.2.2.4.	Modelo Logistic.....	51
4.2.2.5.	Modelo Logistic Modificado	51
4.2.2.6.	Modelo Weibull.....	52
4.2.3.	Validação dos modelos aplicados ao crescimento celular e consumo de substrato.....	52
4.3.	Processamento mínimo do mamão	53

4.4.	Revestimento das fatias de mamão.....	53
4.5.	Secagem.....	53
4.6.	Viabilidade da cultura probiótica.....	55
4.7.	Modelagem matemática da cinética de secagem.....	55
4.9.	Modelo de difusão.....	56
4.9.1.	Condição de contorno do primeiro tipo.....	56
4.9.2.	Condição de contorno do terceiro tipo.....	57
4.10.	Energia de ativação e propriedades termodinâmicas.....	58
4.11.	Determinação do encolhimento.....	59
4.12.	Parâmetros de cor.....	59
4.13.	Perfil de textura.....	60
4.14.	Reidratação.....	60
4.15.	Densidade aparente.....	61
4.16.	Densidade sólida.....	61
4.17.	Porosidade.....	62
4.18.	Características físico-químicas.....	62
4.18.1.	pH e acidez total titulável.....	62
4.18.2.	Sólidos solúveis totais.....	62
4.18.3.	Açúcares redutores.....	62
4.18.4.	Compostos fenólicos.....	62
4.18.5.	Flavonoides totais e antocianinas.....	63
4.18.6.	Carotenoides e clorofila total.....	63
4.19.	Análise estatística.....	64
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
5.1.	Otimização da fermentação com <i>Lactobacillus salivarius</i>	65
5.2.	Modelagem matemática: Crescimento celular e consumo de substrato.....	73
5.2.2.	Consumo de substrato.....	81
5.3.	Viabilidade celular durante a secagem.....	84
5.4.	Modelagem matemática: cinética de secagem.....	86
5.5.	Difusividade efetiva: condição de contorno de primeiro e terceiro tipo.....	95
5.6.	Energia de ativação e propriedades termodinâmicas.....	97
5.7.	Encolhimento.....	99
5.8.	Cor.....	101
5.9.	Perfil de textura.....	106

5.10.	Reidratação	107
5.11.	Densidade aparente e sólida.....	109
5.12.	Porosidade.....	110
5.13.	Características físico-químicas das fatias de mamão.....	112
6.	CONCLUSÕES.....	118
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
9.	ANEXO.....	145

1. INTRODUÇÃO

O mamão (*Carica papaya* L., cv. Sunrise Solo) é uma fruta tropical com grande aceitação em todo o mundo devido aos seus nutrientes, sabor e aroma característico. O sabor distinto típico de frutas tropicais, como o mamão, é um fator importante para a preferência e aceitação do consumidor. O sabor característico do mamão é formado por meio de uma interação complexa entre açúcares, ácidos orgânicos, minerais e compostos voláteis (WIJAYA; FENG, 2013).

Segundo a FAO (2018), o Brasil é um dos maiores produtores de mamão do mundo, ao lado da Índia e Indonésia. Em 2018, o Brasil teve uma produção de 1.060.392 toneladas, sendo a região Nordeste a responsável por 53,3% da produção do Brasil, seguida das regiões Sudeste e Norte (IBGE, 2018). Embora tenha uma grande aceitação por todo o mundo, o alto teor de água o torna altamente susceptível à deterioração pós-colheita. O processamento pode ser uma alternativa para explorar qualquer excesso de produção de frutas, oferecendo a oportunidade de agregar valor ao produto e gerar empregos e renda (GERMER et al., 2014).

Com a crescente conscientização sobre a relação entre frutas e saúde, lanches saudáveis e saborosos com adição de probióticos estão em alta demanda em todo o mundo (LI et al., 2018). Os produtos comumente encontrados no mercado como veículo de probióticos são os leites fermentados e os produtos lácteos. No entanto, frutas e vegetais têm sido estudados como alternativa ao consumo de derivados do leite. Porém, devido à sensibilidade dos probióticos às condições comuns de processamento, como tratamento térmico, ambientes com baixo pH, alta pressão osmótica e alto potencial redox, o design de barreiras físico-químicas eficazes para estabilizar os organismos é essencial para sua exploração comercial completa em uma ampla variedade de alimentos (SOUKOULIS et al., 2017)

Para garantir a viabilidade máxima das células probióticas em produtos de origem vegetal, técnicas de secagem como spray drying e liofilização são as mais aplicadas para elaboração de novos produtos. Como alternativa para aumentar a variedade de produtos probióticos, a aplicação de filme comestível adicionado com culturas probióticas tem sido estudada, e um grande número de aplicações já foi investigado (SOUKOULIS et al., 2017). Tais investigações incluem produtos de panificação (GREGIRCHAK; STABNIKOVA; STABNIKOV, 2020), carnes e produtos de pesca (UMARAW et al., 2020), além de frutas (THAKUR et al., 2018) e barras de cereais (PEREIRA et al., 2019). Embora os resultados obtidos sejam promissores na aplicação em alimentos, o efeito das

condições de processo, como a temperatura, que influencia o tempo de processo, requer mais estudos.

As perspectivas para o uso de filmes comestíveis como potenciais transportadores de ingredientes ativos são altas. Filmes comestíveis têm o potencial de estabilizar estruturas de alimentos em comprimentos de escala múltipla enquanto criam estruturas sob medida (propriedades mecânicas aprimoradas, vida útil prolongada, manutenção da integridade estrutural) e podem ser usados para fornecer melhorias nutricionais por meio da inclusão de probióticos (SOUKOULIS et al., 2017).

Aliado ao potencial dos filmes comestíveis como transportadores de probióticos e a ampla utilização das frutas na alimentação humana, o estudo do revestimento de fatias de mamão com uma solução filmogênica probiótica possibilita a disponibilização no mercado um produto inovador com alta qualidade nutricional. No entanto, entre um quarto e um terço dos alimentos produzidos anualmente para o consumo humano, se perde ou é desperdiçado. Isso equivale a cerca de 1,300 bilhões toneladas de alimentos, sendo as frutas, hortaliças, raízes e sementes responsável por 40 a 50% deste número (BENÍTEZ, 2015).

Uma alternativa para conservação pós-colheita de frutos e redução do desperdício, é a secagem. A mesma traz várias vantagens para os alimentos: redução do custo de armazenamento, embalagem e transporte, aumento do prazo de validade e sem necessidade de refrigeração (BOUDHRIOUA et al., 2002). Uma vez que frutas e vegetais são secos para inibir a atividade microbiana patogênica, enzimática e a deterioração da qualidade, onde a reduzida atividade de água do material seco resulta na diminuição das alterações físico-químicas durante o armazenamento (ARAL; BEŞE, 2016).

Porém, um alto incremento da temperatura de secagem promove mudanças organolépticas e nutricionais em produtos alimentícios que podem causar degradação da qualidade (GIAMPIERI et al., 2012). Melhorias na qualidade de alimentos desidratados podem ser alcançadas através da utilização de condições de processamento específicos e aplicação de pré-tratamentos, e a aplicação de revestimento comestível é uma das técnicas que podem minimizar alterações indesejáveis no produto seco.

A aplicação de soluções filmogênicas antes do processo de secagem pode ser usada para minimizar reações oxidativas nos alimentos durante a secagem com ar quente, tendo em vista que revestimentos comestíveis de polissacarídeos e proteínas apresentam baixa barreira ao vapor de água, e boas propriedades de barreiras a gases como o oxigênio (SILVA et al., 2015). Além disso, são amplamente estudados como agente encapsulante

na microencapsulação, permitindo o revestimento e a proteção de compostos sensíveis ou células vivas (PRISCO; MAURIELLO, 2016).

Considerando a aplicação de técnicas que preservem as características funcionais dos alimentos, e que promovam o fornecimento de bactérias probióticas em quantidades adequadas para que exerçam seus benefícios a saúde humana, propõe-se neste trabalho o estudo da incorporação do *Lactobacillus salivarius* através do revestimento comestível formulado a partir da combinação de gelatina com inulina em fatias de mamão, e avaliar os efeitos do revestimento no processo de secagem, qualidade física e físico-química e viabilidade do probiótico no produto seco.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica e testar modelos matemáticos para determinar parâmetros de significado biológico e revestir fatias de mamão com a solução filmogênica probiótica para obter fatias probióticas de mamão desidratadas.

2.2. Objetivos específicos

- Elaborar e avaliar os efeitos da composição e condições de processo das soluções filmogênicas no crescimento das células probióticas;
- Estabelecer condições operacionais a partir das características biológicas diante da curva de crescimento do probiótico na solução filmogênica;
- Modelar a curva de crescimento e consumo de substrato nas condições ótimas de crescimento do *Lactobacillus salivarius*;
- Avaliar a qualidade físico-química do mamão *in natura*;
- Estudar a cinética de secagem das fatias de mamão revestidas;
- Avaliar a viabilidade do probiótico durante a secagem convectiva em diferentes temperaturas;
- Avaliar os efeitos do revestimento comestível na cinética de secagem das fatias de mamão em diferentes temperaturas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Mamão

O mamão (*Carica papaya* L.) pertence à família das Caricáceas, sendo uma cultura de grande importância econômica em todo o mundo, consumido fresco em muitos países, com alto potencial para ser industrializado (ZERPA-CATANHO et al., 2017). Além disso, é muito apreciada por seu valor nutricional, suas características sensoriais e efeitos digestivos (PAES; CUNHA; VIOTTO, 2015). Diante disso, há um aumento de produtos derivados do mamão, tanto na alimentação quanto na indústria (CALVACHE et al., 2016).

O mamão é uma baga de forma variável de acordo com o tipo de flor, podendo ser arredondado, oblongo, alongada, cilíndrico e piriforme, com casca fina e lisa, de coloração amarelo-clara a alaranjada, protegendo uma polpa com 2,5 a 5,0 cm de espessura e de coloração que pode variar de amarelo a avermelhada (LIMA et al., 2018).

As variedades de mamão comercial são classificadas em dois grupos: Solo e Formosa. Os frutos do grupo Solo são caracterizados pelo peso médio de 350 a 600 g e representam a maioria das cultivares consumidas no mundo. O grupo Formosa apresenta frutos com peso médio de 800 a 1100 g. As principais cultivares do grupo Solo são: Sunrise Solo, Golden, Improved Sunrise Solo Line 72/12, Baixinho de Santa Amália, Taiwan, Kapoho Solo, Waimanalo e Higgins. No grupo Formosa, a principal cultivar é o Híbrido F1 Tainung nº1 (DANTAS; JUNGHANS; LIMA, 2013).

Os frutos de mamão são consumidos em vários estádios de maturação, como maduros, semimaduros ou verdes. Segundo Annegowda e Bhat (2016), nas regiões tropicais, o mamão verde é usado como vegetal, lanche e ingrediente em geleias, *curry*, saladas e pickles. Já o mamão maduro geralmente é consumido diretamente fresco pelos consumidores. No entanto, frutas comercialmente maduras encontram aplicações potenciais na preparação de xaropes, frutas secas, iogurtes, geleias, néctares e doces (ANNEGOWDA; BHAT, 2016).

O mamão é uma importante fonte de nutrientes funcionais, como minerais (cálcio, ferro, potássio, sódio), vitaminas (A, B1, B2, C) e carotenoides (licopeno, β -caroteno, β -criptoxantina) (SCHWEIGGERT et al., 2011a). Além da fruta, existe uma alta demanda por papaína, uma enzima digestiva obtida da papaia, que possui um grande valor como ingrediente agregado nas indústrias farmacêutica, de cosméticos e de alimentos (para

aplicações como fabricação de cerveja e amaciamento de carne) (ANNEGOWDA; BHAT, 2016).

Porém, o rápido amolecimento dos frutos durante o amadurecimento aumenta a suscetibilidade a danos mecânicos e as infecções por patógenos, reduzindo o prazo de validade e aumentando as perdas pós-colheita (CHEN; MANENOI; PAULL, 2005). As perdas pós-colheita de mamão ocorrem ao longo de toda a cadeia de valor devido à rápida deterioração de seus componentes químicos, o que resulta em uma vida útil curta do produto fresco (UDOMKUN et al., 2015).

Diante dessa problemática relacionada à comercialização e consumo do mamão fresco, uma diversidade de tecnologias são estudadas para conservação e processamento desse fruto em busca de minimizar as perdas pós-colheita e melhorar aproveitamento de sua composição química. A título de exemplo, pode-se citar o estudo realizado por Farina et al. (2020), no qual, foi estudado a aplicação pós-colheita do revestimento comestível baseado em gel *aloe vera* para melhorar a qualidade e a estabilidade do armazenamento do mamão fresco. Silva Neto et al. (2019) investigaram o efeito do ozônio na conservação pós-colheita de mamão, visando o controle da antracnose e o aumento da vida útil dos frutos. Já Vilaplana et al. (2020) estudaram a combinação de tratamento de água quente e revestimento de quitosana para controle da antracnose em mamão durante o período pós-colheita.

Além dos estudos para a conservação do fruto fresco, o mamão é um fruto com grande potencial para o processamento na indústria. Sendo utilizado na composição e no desenvolvimentos de novos produtos, aliado à aplicação de tecnologias eficientes para conservação da qualidade nutricional, como observado no estudo desenvolvido por Swada; Corcuera e Engeseth (2020), em que foi relatado o impacto do processamento térmico alternativo e não térmico na atividade enzimática de néctares de mamão e morango e suas misturas. Outro exemplo do processamento do mamão para melhor aproveitamento e desenvolvimento de novos produtos é o estudo apresentado por Silva Júnior et al. (2018), no qual a influência do ultrassom e da secagem assistida a vácuo foi avaliada nos parâmetros de qualidade do mamão.

3.2. Filme e revestimento comestível

Filmes e revestimentos comestíveis biodegradáveis como ceras, são utilizados há séculos para evitar a perda de umidade e criar uma superfície brilhante em frutas. O uso de filmes em alimentos data do século XII na China, onde as ceras eram usadas para

revestir frutas cítricas para retardar a perda de água (DEHGHANI; HOSSEINI; REGENSTEIN, 2018). O primeiro filme comestível usado para preservação de alimentos foi feito no século XV a partir de leite de soja (Yuba) no Japão (SÁNCHEZ-ORTEGA et al., 2014).

Os revestimentos comestíveis podem ser definidos como um filme fino produzido a partir de polissacarídeos, proteínas, lipídios ou derivados, agindo como substituto "verde" dos filmes à base de petróleo, podendo serem consumidos juntamente com o produto e geralmente são aplicados na superfície dos produtos alimentícios por escovação, pulverização ou imersão (DIANIN et al., 2019). Enquanto, um filme comestível é uma camada fina pré-formada, feita de material comestível que, uma vez formado, pode ser colocado sobre ou entre alimentos (MCHUGH, 2000).

A aplicação de revestimentos comestíveis nos alimentos já foi demonstrada como eficaz para controlar a vida útil dos produtos nas prateleiras, retardando reações prejudiciais como enzimática, física e química, levantando uma barreira física ou termodinâmica que retarda a movimentação de vapor de água e oxigênio (FALGUERA et al., 2011; SOUKOULIS et al., 2014).

Seu uso em aplicações alimentares e produtos, especialmente altamente perecíveis, como os de horticultura, baseia-se em algumas propriedades particulares, como custo, disponibilidade, atributos funcionais, propriedades mecânicas (flexibilidade, tensão), propriedades ópticas (brilho e opacidade), efeito de barreira contra o fluxo de gases, resistência estrutural à água e micro-organismos e aceitabilidade sensorial (FALGUERA et al., 2011).

Revestimentos e filmes comestíveis são geralmente classificados de acordo com seu material estrutural. Dessa maneira, filmes e revestimentos são baseados em proteínas (gelatina, caseína, albumina do ovo, glúten de trigo, proteína de soro de leite, proteína de soja e proteínas miofibrilares), lipídios (monoglicerídeos acetilados, ácido esteárico, ceras e ésteres de ácido graxo), polissacarídeos (amido, pectina, celulose, alginato, carragena, alfarroba) ou compósitos (AMADO, 2017; FALGUERA et al., 2011).

A otimização da composição dos filmes comestíveis está em uma das etapas mais importantes da pesquisa nesse campo, pois devem ser formulados de acordo com as propriedades das frutas e vegetais aos quais devem ser aplicados (ROJAS-GRAÜ; SOLIVA-FORTUNY; MARTÍN-BELLOSO, 2009). Além disso, a produção de filmes e revestimentos comestíveis combinando vários polissacarídeos, proteínas e lipídeos, é considerada com o objetivo de tirar vantagens das propriedades de cada composto e da

sinergia entre eles (FALGUERA et al., 2011). As propriedades mecânicas e de barreira desses filmes não dependem apenas dos compostos utilizados na matriz polimérica, mas também de sua compatibilidade (SILVA; BIERHALZ; KIECKBUSCH, 2009).

Segundo Dehghani; Hosseini e Regenstein (2018), os revestimentos à base de polissacarídeos são os mais comuns; no entanto, como os polissacarídeos são geralmente muito hidrofílicos, o efeito de barreira à umidade é desprezível, mas proporcionam uma permeabilidade seletiva para O₂ e CO₂ e resistem à migração lipídica. Já as proteínas são ótimos materiais para a formação de filmes e revestimentos comestíveis, pois apresentam excelentes propriedades mecânicas e estruturais, mas apresentam uma fraca capacidade de barreira contra a transferência de umidade. Esse problema não é encontrado nos lipídios devido às suas propriedades hidrofóbicas, especialmente naqueles com altos pontos de fusão, como cera de abelha e de carnauba (FALGUERA et al., 2011).

Os tipos de materiais utilizados na elaboração de filmes e revestimentos biodegradáveis apresentam vantagens e limitações inerentes ao uso em filmes de acordo com a classe química. Quanto aos polissacarídeos, a maioria deles é neutra, embora algumas gomas sejam carregadas negativamente. Devido à presença de um grande grupo de hidroxilas e outros grupos polares em sua estrutura, as ligações de hidrogênio têm uma função crucial na formação do filme e nas características finais (AZEREDO, 2012). Os filmes de polissacarídeos são geralmente formados por interrupções nas interações entre segmentos de polímeros durante a coacervação e formação de novas ligações hidrofílicas intermoleculares após a evaporação do solvente (JANJARASSKUL; KROCHTA, 2010).

As proteínas atraíram a atenção da pesquisa e ganharam importância como potencial material de produção de embalagem comestíveis, por fornecerem uma variedade quase ilimitada de materiais formadores de filmes provenientes de diversas fontes que diferem naturalmente na sequência de aminoácidos (JANJARASSKUL; KROCHTA, 2010). Dehghani, Hosseini e Regenstein (2018), explicaram que o principal mecanismo de formação de filmes de proteínas inclui a desnaturação da proteína iniciada por calor, solventes ou alteração do pH, seguida pela associação de cadeias peptídicas por meio de novas interações intermoleculares. Filmes baseados em proteínas geralmente têm boas propriedades mecânicas e ópticas, com boa barreira contra o transporte de O₂, CO₂, aroma e lipídios; no entanto, a barreira e as propriedades mecânicas dos filmes de proteínas são comprometidas pela umidade devido à sua natureza hidrofílica inerente (JANJARASSKUL; KROCHTA, 2010).

Filmes e revestimentos comestíveis baseados em materiais hidrofóbicos, como lipídios, têm sido utilizados, particularmente, para limitar a transmissão de umidade dos alimentos (DEHGHANI; HOSSEINI; REGENSTEIN, 2018). Ao contrário de outras macromoléculas, os compostos lipídicos e de resina não são biopolímeros, não sendo capazes de produzir filmes coesos e autossustentáveis, uma vez que não tem um grande número de unidade de repetição conectadas por ligações covalente para formar uma grande estrutura molecular (JANJARASSKUL; KROCHTA, 2010). Assim, eles são usados como revestimentos ou incorporados em biopolímeros para formar filmes compostos, proporcionando uma boa barreira ao vapor de água, graças à sua baixa polaridade (GREENER; FENNEMA, 1989).

Os filmes e revestimentos compostos, são elaborados com o objetivo de combinar as propriedades funcionais de cada material e superar suas falhas. A maioria dos filmes compostos estudados até o momento envolve a combinação de compostos lipídicos com uma matriz estrutural à base de hidrocolóides, uma vez que revestimentos e filmes comestíveis à base de polissacarídeos e proteínas, são geralmente barreiras gasosas eficientes e têm propriedades mecânicas moderadamente boas à baixa umidade relativa, enquanto os lipídeos são eficazes contra migração de umidade, mas suas propriedades mecânicas são inferiores as dos filmes hidrocolóides devido sua natureza não polimérica (JANJARASSKUL; KROCHTA, 2010).

Combinações entre polissacarídeos e proteínas também são utilizadas para formulação de filmes e revestimentos comestíveis. Segundo McClements (2015) os complexos de polissacarídeos e proteínas poderiam melhorar a resistência das emulsões a estresses ambientais como pH, força iônica e temperatura. Misturas de proteínas e polissacarídeos sob condições específicas (pH, força iônica, temperatura, agitação) ou em determinadas quantidades podem resultar em soluções conjugadas que formam filmes complexos com maior estabilidade e funcionalidade em relação aos filmes formados com somente um dos biopolímeros (MURILLO-MARTÍNEZ et al., 2011).

3.2.1. Gelatina

Gelatina é um material macromolecular natural extraído de peles, ossos e tecidos conjuntivos de animais. As propriedades funcionais da gelatina estão estreitamente relacionadas com a sua composição de aminoácidos e distribuição de massa molar. Além disso, os aminoácidos (prolina e hidroxiprolina) são reconhecidos por desempenhar um papel fundamental na renaturação da gelatina durante a gelificação. Gelatina com maior

teor de aminoácidos exibem melhores propriedades viscoelásticas, que são positivas em relação à capacidade de formação de gel (CHEN et al., 2015).

A gelatina é um derivado proteico do colágeno, extraído pelo aquecimento de tecidos conjuntivos como tendões, cartilagens e ossos, além de pele de animais como peixes, bovinos e suínos. O colágeno insolúvel é convertido em gelatina solúvel por tratamentos hidrolíticos (KIM et al., 2006; MARFIL, 2014). As principais propriedades tecnológicas da gelatina envolvem capacidade de gelificação, estabilização, texturização, emulsificação, adesividade, sedimentação e encapsulamento. Portanto, é amplamente utilizada nas indústrias alimentícias e farmacêuticas. Na indústria de alimentos, a gelatina tem uma variedade de aplicações, incluindo a formação de gel em gelatinas, formação de espuma e estabilização de gelados, de emulsão em produtos cárneos e no iogurte (CEBI et al., 2016).

Ademais é um polímero natural, biodegradável e não tóxico, cuja composição típica contém 14% de teor de água, 84% proteína e 2% de cinzas. A proteína consiste de uma mistura de aminoácidos, cuja composição depende da fonte da qual é extraída (GILSENAN; ROSS-MURPHY, 2000).

Marfil (2014) explica que as gelatinas possuem caráter anfótero, ou seja, apresenta-se negativamente carregadas acima de seu ponto isoelétrico e positivamente abaixo dele, o que permite seu emprego na técnica de microencapsulação. É possível obter dois tipos de gelatina, dependendo do procedimento de pré-tratamento, e são conhecidos comercialmente como gelatina tipo A (ponto isoelétrico a pH 8 e 9) e gelatina tipo B (ponto isoelétrico pH 4 e 5) obtidos sob condições de pré-tratamento ácido e alcalino, respectivamente (GOMEZ-GUILLEN et al., 2011).

Como material de revestimento, a gelatina possui propriedades mecânicas desejadas, baixo custo de produção, propriedades de barreira eficaz contra o oxigênio, dióxido de carbono e lipídeos (ALCÂNTARA et al., 2019; JIANG et al., 2010). No entanto, o uso de gelatina em revestimentos de alimentos é limitado por suas propriedades de barreira à umidade fracas e alta capacidade de ligação à água, o que resulta em inchaço ou dissolução do filme resultante do contato com alimentos aquosos (GOMEZ-GUILLEN et al., 2011).

Entretanto, a eficácia de revestimentos comestíveis para frutas, vegetais e peixes depende muito da molhabilidade dos revestimentos, que por sua vez afeta a espessura e a uniformidade do revestimento e, conseqüentemente, influencia a permeabilidade e as propriedades dos revestimentos após a secagem (ALCÂNTARA et al., 2019).

3.2.2. Inulina

A relevância da inulina para a indústria alimentícia baseia-se em seu uso cada vez maior como substituto de gordura e açúcar, como texturizador especialmente em produtos lácteos com baixo teor de gordura e como meio de melhorar as características de um produto alimentício, contribuindo para melhorar as condições do sistema gastrointestinal, é devido a essas propriedades que as indústrias alimentícias e farmacêuticas vêm encontrando aplicação de inulina e seus derivados, como frutooligossacarídeos, na produção de alimentos funcionais, compósitos nutricionais e medicamentos (APOLINÁRIO et al., 2014; MUZZARELLI et al., 2012).

As fibras das frutas e verduras são especialmente utilizadas como aditivos alimentares funcionais devido às suas propriedades prebióticas, promovendo o crescimento de bactérias saudáveis no intestino; entretanto, apesar do interesse em incorporar compostos nutracêuticos em produtos alimentícios, sua integração em revestimentos comestíveis tem sido pouco estudada (MOREIRA et al., 2015).

A inulina é um polissacarídeo não digerível que pertence a uma classe de fibras alimentares conhecidas como frutanos (MOREIRA et al., 2015), com uma cadeia β -D-frutose ligada por (2 \rightarrow 1) ligações glicosídicas e uma molécula terminal de α -D-glucopiranosose ligada a uma cadeia de frutose através de uma ligação glicosídica (1 \leftrightarrow 2). Inulina é encontrada principalmente em tubérculos de alcachofra, chicória, yacon e raízes de bardana (CAO; YANG; SONG, 2018).

O grau de polimerização (DP) da inulina varia de 2 a 60, dependendo da planta fonte, maturidade na colheita, condições pós-colheita e técnicas de processamento (MENSINK et al., 2015). Dependendo do grau de polimerização, a inulina exhibe capacidade de formação de microcristais e de gel, e compatibilidade com outros polímeros (APOLINÁRIO et al., 2014). A propriedade gelificante da inulina é grandemente influenciada pela concentração de inulina, quantidade total de substância seca, fatores de cisalhamento como temperatura, tempo, velocidade ou pressão e, além disso, pelo tipo de instrumento de cisalhamento utilizado; no entanto, não é afetado pelo pH (entre 4 e 9) (SHOAIB et al., 2016).

3.3. Filme e revestimento comestível como veículo para probióticos

Os revestimentos comestíveis têm alto potencial para transportar ingredientes ativos, como agentes anti-escurecimento, corantes, sabores, nutrientes, especiarias e compostos antimicrobianos que podem prolongar a vida útil do produto e reduzir o risco

de crescimento de patógenos nas superfícies dos alimentos (PRANOTO; SALOKHE; RAKSHIT, 2005).

Nas formulações de embalagens comestíveis, a adição de certos compostos para conferir novas propriedades é frequentemente considerado. Os compostos a serem incorporados são de natureza diferente e podem ser limitados para manter a qualidade e a segurança dos alimentos (embalagem ativa), ou podem até levar a um potencial efeito benéfico à saúde do consumidor (embalagem bioativa) (LACEY et al., 2012).

Revestimentos comestíveis podem ser utilizados como matrizes de encapsulamento para muitos compostos bioativos. O processo de encapsulamento é baseado no efeito de incorporação de um revestimento comestível, que cria um microambiente na matriz estrutural capaz de controlar as interações entre a parte interna e a externa (RAVICHANDRAN et al., 2014).

No campo da tecnologia de preservação de frutas e vegetais, os revestimentos comestíveis apareceram como uma opção para prolongar a vida útil principalmente dos produtos frescos, além de possivelmente atuarem como portadores de culturas probióticas (SHIGEMATSU et al., 2018). Diante disso, tem-se observado o aumento de pesquisas relacionadas à incorporação de micro-organismos probióticos em filmes e revestimentos comestíveis, com intuito de aplicar em produtos alimentícios diversificados. Tapia et al. (2007), desenvolveram um dos primeiros estudos relacionados à adição de probióticos em filmes comestíveis à base de alginato e goma gelana para revestimento de maçã e mamão minimamente processados.

Lacey et al. (2012) ao estudar filmes de ágar contendo extrato de chá verde e bactérias probióticas para prolongar a vida útil dos peixes, verificaram que os filmes com chá verde e probióticos foram capazes de prolongar o prazo de validade da pescada por pelo menos uma semana e aumentar o número de bactérias benéficas do ácido láctico.

Efeitos da adição de probióticos em filmes utilizados para revestimentos de frutas foram relatados por Dianin et al. (2019), nos quais, aplicaram biofilmes comestíveis formulados com Whey Protein Isolate e cultura probiótica de *Lactobacillus casei* em uvas e tomates, obtendo resultados positivos. Pesquisas recentes reportaram o estudo de revestimentos probiótico aplicados em cenouras frescas minimamente processadas (SHIGEMATSU et al., 2018) e em pedaços de maçã e melão (SPERANZA et al., 2018), dos quais, foi verificado que os revestimentos comestíveis a base de alginato mostrou-se eficiente, não afetando a viabilidade do probiótico, no entanto, não foram observados

estudo relatando a aplicação de revestimentos probióticos para desenvolver produtos desidratados.

3.4. Probióticos

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), probióticos são micro-organismos vivos que, quando administrado em quantidades adequadas, confere um benefício à saúde do indivíduo (BRASIL, 2018). Para fornecer benefícios para a saúde do hospedeiro, é necessário manter a viabilidade dos probióticos (vp) acima do mínimo terapêutico ($vp > 10^6$ UFC mL⁻¹), sendo influenciada pela composição da matriz alimentar e pelas condições de processo (HUSSAIN et al., 2016). No entanto, recomenda-se a ingestão do mínimo de 10^8 UFC mL⁻¹ para compensar a redução que acontece no número de micro-organismos viáveis durante a passagem pelo trato gastrointestinal (PIMENTEL, 2011).

Segundo Raizel et al. (2011) alguns indivíduos podem vivenciar pouco dos efeitos colaterais relacionados à ingestão dos probióticos devido à morte dos patógenos no ambiente intestinal, visto que esses liberam produtos celulares tóxicos, reação chamada de “die-off reaction”. Nesses casos, indica-se persistir no uso dos probióticos para que haja melhora dos sintomas.

Salminen et al. (1999) definiram probióticos como preparações de células microbianas ou componentes de células microbianas que têm um efeito benéfico na saúde e no bem-estar do hospedeiro. Quirós-Sauceda et al. (2014) especularam que alguns dos mecanismos por trás dos efeitos probióticos na saúde podem não depender da viabilidade das células e, portanto, também é possível que probióticos não viáveis possam ter alguns benefícios à saúde. Mesmo não sendo claro o mecanismo de ação, esse parece estar associado à adesão, em que, a adesão probiótica aos tecidos hospedeiros facilita as interações micro-organismo e hospedeiro, podendo ser um determinante essencial para eficácia probiótica. Alguns relatos sugerem que probióticos viáveis e não viáveis são igualmente aderentes ao muco intestinal (LAHTINEN, 2012).

Inúmeros são os benefícios atribuídos aos probióticos, sendo os principais determinados a partir de resultados de estudos clínicos, enquanto outros são adquiridos com base em testes *in vitro*, que necessitam de transposição *in vivo* para serem avaliados. Contudo, interesses clínicos primários quanto aos probióticos relatados na literatura têm sido relacionados com o tratamento de doenças infecciosas incluindo diarreia viral ou bacteriana e doenças inflamatórias crônicas. Os mecanismos e a eficácia dos efeitos

probióticos são descritos como dependentes das frequentes interações com a microbiota específica do hospedeiro ou com as células imunocompetentes da mucosa intestinal (FURTADO, 2017; SAAD et al., 2013). Além disso, alguns probióticos podem ser usados como compostos antimicrobianos contra patógenos alimentares, sendo esses compostos, peptídeos produzidos ribossomáticamente por bactérias do ácido láctico e podem ser considerados conservantes ou biopreservadores naturais (SHARAFI et al., 2013).

Muitos fatores como acidez, teor de oxigênio e concentração de ácidos láctico e acético, afetam a sobrevivência dos probióticos nos alimentos e no trato gastrointestinal do hospedeiro. Diante disso, vários métodos têm sido utilizados para aumentar a viabilidade de probióticos, incluindo seleção de cepas resistentes, adaptação ao estresse, incorporação de micronutrientes e microencapsulação (ROKKA; RANTAMÄKI, 2010).

O uso de alimentos como transportadores de probióticos ajudam a tamponar o probiótico através do trato gastrointestinal, regular sua colonização e por conter outros ingredientes funcionais, que podem interagir com probióticos para modificar sua funcionalidade e eficácia. Por esse motivo, a incorporação de probióticos a produtos alimentícios tem aumentado, para garantir produtos que tragam segurança e saúde para o consumidor (QUIRÓS-SAUCEDA et al., 2014).

Os probióticos são geralmente transportados por meio de leites fermentados, laticínios ou produtos farmacêuticos. No entanto, o aumento da incidência de intolerância à lactose, alergias às proteínas do leite, algumas preocupações com o colesterol e a disseminação mundial de novos estilos de vida (veganos e vegetarianos) são as principais causas de um interesse crescente por alimentos probióticos não lácteos, como os veículos vegetais para probióticos (SPERANZA et al., 2018).

As cepas probióticas mais comumente aplicadas, relatadas na literatura, pertencem aos gêneros de *Bidobacterium* e *Lactobacillus*. *Lactobacillus* spp. sendo um dos probióticos mais amplamente utilizados podendo ser encontrados em uma grande variedade de produtos alimentícios em todo o mundo. O gênero *Lactobacillus* compreende um grande grupo heterogêneo de bactérias anaeróbias facultativas Gram-positivas, não esporuladas, que incluem *L. acidophilus*, *L. rhamnosus*, *L. bulgaricus*, *L. casei*, *L. reuteri*, entre outros. Esse gênero desempenha um papel muito importante na fermentação de alimentos e também pode ser encontrado no sistema gastrointestinal de humanos e animais em quantidades variáveis, dependendo da espécie, idade do hospedeiro ou localização dentro do intestino (DUAR et al., 2017; MU; TAVELLA; LUO, 2018).

Os *Lactobacillus* estão associados à produção de alimentos por causa da ação conservante decorrente da acidificação e/ou aprimoramento do sabor, textura e nutrição, causando rápida diminuição do pH na matéria-prima através da produção de ácido láctico como principal produto catabólico (GIRAFFA; CHANISHVILI; WIDYASTUTI, 2010). Além disso, a atividade proteolítica e a produção de compostos aromáticos, bacteriocinas e exopolissacarídeos são relevantes para a qualidade e o valor nutricional do produto final, ampliando o espectro de aplicações biotecnológicas desse importante grupo de bactérias do ácido láctico (LEROY; DE VUYST, 2003).

3.4.1. *Lactobacillus salivarius*

Os *Lactobacillus* são excelentes candidatos a métodos de controle alternativos devido à natureza autônoma e à dominância da microbiota do trato gastrointestinal superior. Nos últimos anos, *Lactobacillus salivarius* ganhou atenção como espécie probiótica promissora. A espécie *L. salivarius* deve seu nome às propriedades 'salivares' da cavidade oral da qual foi isolada pela primeira vez (ROGOSA et al., 1953).

O *L. salivarius* é um lactobacilo homofermentativo isolado da cavidade oral do homem (GIRAFFA; CHANISHVILI; WIDYASTUTI, 2010). Cresce em condições anaeróbicas, com pH ótimo sendo na faixa de 5,5 a 6,5, produtor de ácido láctico e ácidos graxos de cadeia curta a partir da fermentação da glicose; com capacidade de inibir o crescimento de patógenos bacterianos (SAYAN et al., 2018).

Propriedades probióticas foram atribuídas a muitas espécies de *L. salivarius*, como a capacidade de modular a microbiota, produzir substâncias antimicrobianas, estimular a resposta imune protetora, inibir a atividade enzimática fecal, produzir ácidos graxos da cadeia curta, permitindo uma acidificação conveniente do intestino (DOBSON et al., 2012; MESSAOUDI et al., 2013).

Estudos recentes mostraram as ações potenciais do *L. salivarius* em cárie dentária, doenças periodontal e mau hálito (HIGUCHI et al., 2019), como antimicrobiano (KRZYŚCIAK et al., 2017) e no auxílio e prevenção no tratamento de doenças inflamatórias do intestino (RAJKUMAR et al., 2015). Diante desses benefícios, estudos sobre a utilização de matrizes alimentícias para o transporte de probióticos tem crescido, uma vez que a população mundial tem buscado alimentos de qualidade com atributos que implicam em melhorias na saúde humana, e o *Lactobacillus salivarius* é um probiótico promissor.

3.5. Filme e revestimentos comestíveis como pré-tratamento à secagem

Pesquisas relacionadas ao uso de revestimentos comestíveis em frutas são frequentemente voltadas para a conservação pós-colheita de frutos e vegetais; no entanto, a utilização de revestimentos comestíveis anteriores à secagem de frutas tem sido relatada na literatura. Há alguma indicação de que, durante o processo de secagem, a aplicação desses revestimentos pode reduzir a perda de aroma, cor e nutrientes, reduzindo a difusão de oxigênio nos alimentos, minimizando a incorporação de solutos e mantendo a integridade física do produto (LAGO-VANZELA et al., 2013).

A contribuição dos revestimentos comestíveis para a retenção de nutrientes antes da secagem, deve-se à diminuição do contato da matéria vegetal com o oxigênio durante o processo de secagem, porém, esses biopolímeros utilizados no revestimento podem afetar a eficiência da secagem e sua escolha deve ser baseada na permeabilidade de gás e água, que variam com o teor de água (CUQ; GONTARD; GUILBERT, 1995; LAGO-VANZELA et al., 2013).

Molina Filho, Frascareli e Mauro (2016), estudaram os efeitos de um pré-tratamento de revestimento comestível de pectina e branqueamento na cinética de secagem ao ar de abóbora (*Cucurbita moschata*), os quais concluíram que o revestimento de pectina nas condições estudadas era promissor para o pré-tratamento na secagem de abóbora, observaram também que o revestimento aumentava ligeiramente o tempo de secagem, não afetando a eficiência da secagem.

Altas retenções de compostos fenólicos e carotenoides totais foram relatado no estudo dos efeitos de revestimentos à base de pectina contendo subprodutos de goiaba sobre a cinética de secagem e as propriedades nutricionais da goiaba vermelha, no qual, os autores constataram que os revestimentos melhoraram a qualidade nutricional sem causar grande impacto nos tempos de secagem (TODISCO et al., 2018).

Os efeitos de revestimentos comestíveis à base de polissacarídeos em kiwis também foram relatados por Oliveira e Silva (2017), mostrando o potencial do uso de revestimentos comestíveis como uma alternativa para obter alimentos secos de alta qualidade, reduzindo a perda de vitamina e o escurecimento do produto sem afetar a transferência de massa durante a secagem por ar quente.

Estudos com aplicação de materiais à base de polissacarídeos e proteínas tem sido utilizado como agente de proteção térmica, visando aumentar a viabilidade de micro-organismos com potencial probiótico em processos de secagem. O uso desses materiais na elaboração de revestimentos comestíveis contendo micro-organismos probiótico têm sido

amplamente estudado, devido à possibilidade de aplicação em uma grande variedade de produtos. No entanto, a aplicação de revestimentos comestíveis adicionados de micro-organismos probióticos em frutas antes do processo de secagem convectiva, ainda é escasso. Porém, pesquisas similares a proposta neste trabalho foram realizadas por Rodrigues et al. (2018) no desenvolvimento de cubos probióticos secos de maçã incorporados com *Lactobacillus casei* NRRL B-442 por processo de desidratação osmótica, sugerindo que o micro-organismo protegido por uma matriz alimentar, minimizaria o problema da viabilidade desse durante a secagem, uma vez qualquer tratamento térmico afetará sua viabilidade.

3.6. Secagem

A secagem é um importante método de preservação de frutas e vegetais, pois remove a umidade dos alimentos e reduz a atividade da água, retardando a ação das enzimas e minimizando as reações de deterioração mediadas pela água durante o armazenamento (SILVA et al., 2015).

Uma das principais preocupações no processo de secagem é fornecer condições ideais para obtenção de produtos de qualidade, que podem ser obtidos através da análise dos parâmetros de transferência de umidade em termos de difusividade e coeficiente de transferência de umidade (BEZERRA et al., 2015), uma vez que a secagem é, provavelmente, o processo da indústria que consome mais energia, correspondendo até 15% de todo uso industrial de energia (CHUA et al., 2001). Portanto, qualquer melhoria na eficiência do processo de secagem de alimentos levará a um desenvolvimento sustentável da perspectiva da energia global (KUMAR; KARIM; JOARDDER, 2014).

A taxa de secagem e as propriedades do produto seco dependem das condições externas do processo como temperatura do ar, umidade, velocidade e direção do fluxo de ar e de condições internas como a geometria, espessura, forma e estrutura do produto (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

Outra questão importante na secagem de alimentos é a qualidade do produto seco. A secagem causa alterações nas propriedades dos alimentos, incluindo descoloração, perda de aroma, alterações na textura, valor nutritivo e alterações na aparência e na forma física (QUIRIJNS, 2006). De acordo com Kumar, Karim e Joardder (2014), a condição do ar de secagem tem um grande efeito nos atributos de qualidade do produto seco, sendo visto que, em temperaturas mais alta, reduz o tempo de secagem, mas pode resultar em baixa qualidade do produto final. Por outro lado, condições suaves com temperaturas mais

baixas podem melhorar a qualidade do produto, mas diminui a taxa de secagem, prolongando o período de secagem.

O ajuste das condições de processamento como temperatura, tempo e adição de pré-tratamentos à secagem, permite obter melhorias na qualidade de alimentos desidratados. Além do que, as diferentes técnicas de secagem podem propiciar características peculiares ao produto seco.

3.7. Frutas secas probióticas

As frutas são materiais biológicos e fonte de muitos compostos biológicos, de sabor e aroma, de interesse para a saúde e a indústria (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018). Segundo Chang, Alasalvar e Shahidi (2016), as frutas constituem uma parte importante da dieta humana, desempenhando um papel importante na prevenção primárias e secundárias de doenças transmissíveis, isso porque as frutas fornecem vitaminas essenciais, minerais e vários fitoquímicos que conferem benefícios significativos à saúde.

A maioria das frutas frescas são processadas por diversas técnicas para que possam ser consumidas ao longo do ano, uma vez que a maioria das frutas comuns são produzidas sazonalmente e, portanto, pode não está disponível em condições frescas durante o ano (CHANG; ALASALVAR; SHAHIDI, 2016).

A secagem é uma das técnicas mais amplamente utilizada na conservação de frutas, pois a redução do teor de água reduz a atividade microbiana e deterioração do produto. No entanto, cada produto precisa ser seco de maneiras diferentes, usando etapas apropriadas de pré e pós-processamento, para agregar valor satisfatório ao produto alimentício, uma vez que algumas mudanças físicas, e em alguns casos, reações químicas e bioquímicas desejáveis ou indesejáveis, podem ocorrer na operação de secagem, levando a alterações na qualidade do produto final (OMOLOLA; JIDEANI; KAPILA, 2017).

Embora as passas, os figos, as tâmaras, as ameixas e os damascos sejam os frutos secos mais comuns no mercado, as lojas de alimentos e os mercados locais oferecem muito mais opções, como maçãs secas, abacaxi, frutas, mangas e mamão, entre outros (CHANG; ALASALVAR; SHAHIDI, 2016).

Atualmente, tem-se observado um crescimento na busca por produtos probióticos saudáveis e como alternativas ao consumo de derivados lácteos. Isso tem sido evidenciado pelo crescente número de pesquisas nesse campo de conhecimento. Os

alimentos que contêm micro-organismos probióticos estão entre os vários alimentos funcionais atualmente disponíveis no mercado, estimando-se um crescimento de 38% entre os anos de 2016 e 2021 para o mercado global de probióticos (RODRIGUES et al., 2018).

A incorporação de probióticos em frutas secas, como alternativa saudável a lanches salgados ou açucarados tem despertado o interesse dos pesquisadores e da indústria alimentícia. Zura-Bravo et al. (2019) estudaram a cinética de secagem de bagas de murta impregnadas com probiótico (*Lactobacillus casei*) para obtenção de um lanche seco com probióticos, observando diferença na concentração de células viáveis conforme a técnica de secagem aplicada. A viabilidade de incorporar *Lactobacillus plantarum* em cubos de maçã durante a desidratação osmótica foi investigado por Emser et al. (2017), mostrando ser eficiente no processo de incorporação do probiótico em frutas.

Os efeitos de diferentes métodos de secagem na qualidade, viabilidade e estabilidade do armazenamento de lanches enriquecidos com probióticos, revelaram que o método de secagem de liofilização seguida de secagem a vácuo por micro-ondas pode ser usado como um método de secagem adequado para o desenvolvimento de lanches de maçã enriquecidos com probióticos, considerando cor, textura, qualidade sensorial, viabilidade bacteriana e estabilidade de armazenamento (LI et al., 2018).

A impregnação de *Lactobacillus rhamnosus* por desidratação osmótica em solução hipertônica de sacarose 50%, seguida de secagem por liofilização de fatias de banana, mostraram que é possível obter frutos secos enriquecidos com probiótico e com boa estabilidade de armazenamento (RASCÓN et al., 2018). No entanto, notou-se a necessidade do estudo de novas técnicas de incorporação de probióticos em alimentos, otimizando o processo e minimizando custos da produção e, ao mesmo tempo preservando a qualidade nutricional do produto seco.

3.8. Modelagem matemática

3.8.1. Modelos matemáticos na microbiologia

A microbiologia preditiva é uma ferramenta que vem sendo amplamente utilizada pela indústria para determinar o tempo de vida útil do produto, uma vez que reações de deterioração podem ocorrer em função do crescimento de micro-organismos deteriorantes. No entanto, os alimentos contendo cepas probióticas é destaque dentre as buscas por alimentos saudáveis. O uso de modelos preditivos na elaboração de novos produtos podem ser uma ferramenta essencial para ajudar a esclarecer como condições

específicas que prevalecem no ambiente alimentar influenciam a eficácia do crescimento de bactérias do ácido láctico e/ou da sua produção de metabólitos (LEROY; DE VUYST, 2003). Segundo Whiting (1995) modelos preditivos descrevem o crescimento de micro-organismos de maneira rápida, eficiente e econômica, em comparação com os métodos tradicionais de enumeração, que são de alto custo e demorados.

Alguns tipos de modelos são utilizados no estudo da modelagem preditiva do comportamento microbiano em alimentos, no qual Stavropoulou e Bezirtzoglou (2019) explicaram os modelos cinéticos, modelos de probabilidade, modelos empíricos e outros.

Os modelos cinéticos podem prever os níveis de concentração associados a uma determinada cepa microbiana, os quais são calculados com as taxas de crescimento ou resposta à morte (SMITH; SCHAFFNER, 2004). Já os modelos de probabilidade têm sido usados para prever a produção de toxinas por micro-organismos. Esses modelos apenas sugerem a probabilidade de crescimento bacteriano e suas toxinas, mas não a velocidade com que o efeito ocorre (FAKRUDDIN et al., 2011; STAVROPOULOU; BEZIRTZOGLU, 2019; STUMBO et al., 1983).

Os modelos empíricos oferecem relações matemáticas entre entradas e saídas sem qualquer ligação da estrutura a um parâmetro físico-químico ou outro fator. A principal desvantagem de tais modelos é a incapacidade de validar as condições concretas desenvolvidas. No entanto, esse procedimento obviamente simples é, na verdade, oferecido por um *software* de planilha equipado com programações de plotagem de gráficos. Modelos empíricos baseados em relações de duas variáveis nos permitem correlacionar a qualidade do produto final alcançada com o tempo de procedimento (STAVROPOULOU; BEZIRTZOGLU, 2019).

Os modelos matemáticos empíricos utilizados na microbiologia preditiva são categorizados principalmente como modelos primários, secundários e terciários. Os modelos primários são equações matemáticas que definem os dados de crescimento em função do tempo sob uma condição ambiental constante. O modelo de Baranyi (BARANYI; ROBERTS, 1994) é o mais amplamente utilizado para descrever dados de crescimento microbiano. Os modelos secundários utilizam parâmetros determinados pelos modelos primários para prever alterações na estrutura microbiana e na taxa máxima de crescimento específico em função de fatores ambientais como a temperatura, oxigênio, pH e atividade da água (*aw*). A taxa máxima de crescimento específico, que é um dos parâmetros cinéticos de crescimento mais crítico, pode ser modelada usando os modelos secundários. A temperatura tem o papel fundamental de afetar o comportamento de

crescimento de micro-organismos nos alimentos. Os modelos de Ratkowsky (RATKOWSKY et al., 1982) e Arrhenius (TAOUKIS; KOUTSOUMANIS; NYCHAS, 1999) são exemplos de modelos secundários frequentemente usados para determinar a dependência de temperatura no crescimento microbiano. Modelos terciários são formados pela combinação de modelos primários e secundários e usam um computador como ferramenta de estimativa, mas esses modelos sofrem com a falta de informações experimentais em relação a muitos alimentos específicos (TARLAK; OZDEMIR; MELIKOGLU, 2020).

3.8.2. Modelos matemáticos na secagem de alimentos

A modelagem matemática dos processos de secagem e a configuração experimental são aspectos importantes da tecnologia de secagem (KARA; DOYMAZ, 2015). Modelagem matemática na secagem de frutas é o uso de equações matemáticas para prever o comportamento da operação (WANG; CHEN; MUJUMDAR, 2007).

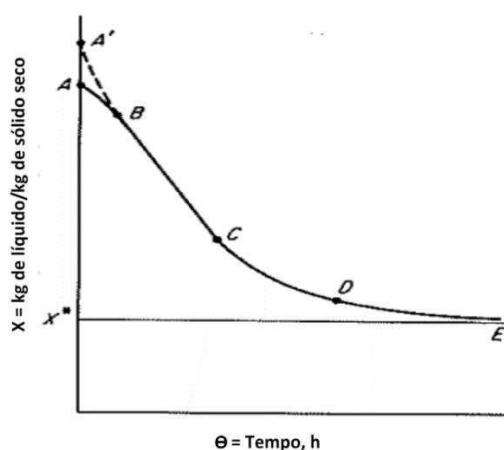
Modelos matemáticos dos processos de secagem são usados para projetar novos ou melhorar sistemas de secagem existentes ou mesmo para o controle do processo de secagem (DOYMAZ, 2017).

Segundo Castro, Mayorga e Moreno (2018) existem várias etapas para abordagem do modelo matemático de secagem, sendo essas etapas:

- Estabelecimento das equações dos fenômenos de transporte: essas equações são baseadas no transporte geral, que governa a maneira pela qual o calor e a transferência de massa se comportam;
- Estabelecimento das premissas do modelo: dimensionalidade, fenômeno de transporte, propriedades do material, retração, entre outros;
- Definição dos parâmetros dos frutos, que dependem das suposições e dos parâmetros de contorno relacionados aos coeficientes de transferência;
- Resolução dos sistemas de equações parciais, através de métodos numéricos ou analíticos e validação de modelos com dados experimentais.

A importância da modelagem é não apenas fornecer previsões do processo, mas também extrair mais detalhes e obter novas ideias sobre o processo de secagem de frutas, uma vez que, não existe um tipo universalmente válido para modelar o comportamento de secagem, que funciona bem para todas os materiais biológicos (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

Embora frutas e vegetais apresentem características estruturais e físico-químicas próprias, o comportamento do teor de água do produto pode ser observado ao longo do tempo. Durante o processo, a água se movimenta de zonas de alta umidade, encontradas no interior do sólido, para zonas de baixa umidade, presente na superfície do produto, de onde é removida sob a forma de vapor (TREYBAL, 1980). O comportamento das transferências de calor e massa durante o processo de secagem, podem ser divididas em três períodos, indentificados na Figura 1.



Fonte: (TREYBAL, 1980).

Figura 1. Curva de secagem típica em condições constantes de secagem.

Na Figura 1, o segmento AB representa o período de adaptação, em geral, a superfície do produto está mais fria que a temperatura que será atingida ao final desse período, ocorrendo aquecimento, proporcionando taxas de secagem crescentes. O segmento BC caracteriza-se como período de taxa constante de secagem, onde ocorre a vaporização da água do alimento, sendo que a migração interna da água é suficiente para compensar a evaporação superficial e manter a condição de saturação superficial. Nos segmentos CD e DE ocorre a redução da taxa de secagem e o aumento da temperatura do produto, caracterizado como o período decrescente (AMADO, 2017; TREYBAL, 1980).

As curvas de secagem são comumente descritas comparáveis de modelos matemáticos que podem ser classificados em duas categorias: aquelas que envolvem equações semiteóricas, por exemplo, os modelos sob o conceito de camada fina e os modelos teóricos baseados na física fundamental da secagem (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018). O teórico mais comumente usado é a segunda lei da difusão de Fick, que foi usada com sucesso para descrever a cinética de secagem de alguns produtos

alimentícios (SAMPAIO et al., 2017). No entanto, modelos semiteóricos, baseados no desenvolvimento serial da segunda lei de Fick, são os mais amplamente utilizados em produtos alimentícios (AKPINAR, 2006).

Esses modelos geralmente baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (CORRÊA et al., 2007).

Esses modelos semiteóricos ainda são utilizados e representam uma boa ferramenta para a cinética de secagem de frutas. No entanto, o uso dos modelos teóricos está aumentando, graças à disponibilidade do cálculo numérico avançado e à sua relevância para o entendimento da secagem de frutas, uma vez que permite estudar a transferência de calor, massa e momento em dois subdomínios (fruta/ar) (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, cujas coordenadas geográficas: 7° 12' 41.8" S 35° 54' 23.3" W, pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, e no Laboratório de Transferência de Calor e Massa, ambos da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

4.1. Obtenção da matéria-prima

Os frutos de mamão da variedade Improved Sunrise Solo cv. 72/12 foram adquiridos na cidade de Campina Grande, oriundos da Empresa Frutas Dolce Mel. Os frutos apresentavam-se em estágio $\frac{1}{4}$ de maduro, que compreende entre 15-25% da casca amarela (Figura 2).



Figura 2. Aspecto visual dos frutos de mamão.

A gelatina foi adquirida no comércio local da cidade de Campina Grande, PB. A inulina foi adquirida da Empresa Zona Cerealista Online. As cepas liofilizadas do *Lactobacillus salivarius* foram adquiridas da marca Farmasite.

4.2. Elaboração da solução filmogênica probiótica

A concentração de gelatina e inulina na elaboração das soluções filmogênicas, bem como os efeitos da temperatura de fermentação, foram estudados através do planejamento fatorial completo 2^3 com 3 repetições no ponto central. As especificações das condições para cada um dos 11 experimentos foram definidas na Tabela 1.

Tabela 1. Matriz do planejamento experimental completo 2^3 com três repetições no ponto central com valores reais das variáveis independentes.

Experimento	Variáveis independentes		
	Gelatina (%)	Inulina (%)	Temperatura (°C)
1	1,0	4,0	25,0
2	3,0	4,0	25,0
3	1,0	6,0	25,0
4	3,0	6,0	25,0
5	1,0	4,0	45,0
6	3,0	4,0	45,0
7	1,0	6,0	45,0
8	3,0	6,0	45,0
9	2,0	5,0	35,0
10	2,0	5,0	35,0
11	2,0	5,0	35,0

As misturas de gelatina e inulina foram aquecidas sob agitação a 80 °C, até ser observado a completa solubilização da gelatina e inulina na água. O aquecimento da solução, além de aumentar a solubilidade da gelatina e da inulina, teve como um dos objetivos a inativação de possíveis micro-organismos patogênicos. A solução filmogênica foi resfriada à temperaturas indicadas no planejamento fatorial completo para a inoculação da cultura probiótica liofilizada. A cepa probiótica liofilizada do *Lactobacillus salivarius* foi inoculada nas soluções filmogênicas em uma concentração inicial de 10 LogUFC mL⁻¹ e agitada durante 10 min para obter uma homogeneidade na amostra. A concentração inicial de 10 LogUFC mL⁻¹ foi adotada visando obter uma concentração máxima de células probióticas na solução filmogênica capaz de promover benefícios à saúde do consumidor, quando consumida através da aplicação em alimentos. Foi levado em consideração que independentemente do processo utilizado na produção do alimento revestido com a solução filmogênica probiótica, pode ocorrer a diminuição da viabilidade das células.

Para o estudo da cinética do processo de fermentação, um volume de 165 mL de solução filmogênica probiótica foi utilizado na fermentação, e esse volume foi distribuído em 11 tubos Falcon de 15 mL. O processo de fermentação ocorreu em condições isotérmicas e, para isso, utilizou-se uma incubadora BOD com temperatura controlada,

sem agitação. As características biológicas do *Lactobacillus salivarius* nas soluções filmogênicas foram determinadas pelo monitoramento da fermentação durante 20 h. A cada intervalo de 2 h, uma alíquota de 15 mL da solução filmogênica probiótica foi coletada e, então, foi determinada a concentração celular pelo método de contagem direta na câmara de Neubauer (Item 3.14). O conteúdo de açúcares redutores nas soluções filmogênicas probióticas durante a fermentação foram utilizados para descrever o consumo de substrato durante o processo de fermentação com o *L. salivarius*. Embora os experimentos referentes às cinéticas de crescimento celular e consumo de substrato tenham sido realizados por 20 h, somente os dados coletados nas primeiras 14 h foram analisados, eliminando-se o período referente à fase de declínio ou de morte celular.

4.2.1. Parâmetros cinéticos

Alguns parâmetros cinéticos foram calculados a partir dos dados experimentais coletados para a curva de crescimento e a quantidade de substrato nas soluções filmogênicas. Tais parâmetros foram o rendimento celular, a taxa máxima de crescimento e o tempo de geração, calculados pelas Equações 1, 2 e 3:

$$Y_{X/S} = \left[\frac{X - X_i}{S_i - S_f} \right] \quad (1)$$

$$\ln \left(\frac{X}{X_i} \right) = \mu_{\max} (t_f - t_i) \quad (2)$$

$$\mu_{\max} = \frac{\ln 2}{t_g} \quad (3)$$

em que: X é a concentração de células no fim da fase exponencial (LogUFC mL⁻¹); X_i é a concentração de células no início da fase exponencial (LogUFC mL⁻¹); t_f é o tempo correspondente ao fim da fase exponencial de crescimento (h); t_i é o tempo no qual observa-se o início da fase exponencial de crescimento (h); t_g é o tempo de geração (h); S_i e S_f são as concentrações de substrato no início e no fim da fase exponencial (%); é o rendimento celular (LogUFC mL⁻¹g⁻¹); é a taxa máxima de crescimento (h⁻¹).

4.2.2. Modelos matemáticos: crescimento celular e consumo de substrato

Os dados médios do crescimento de células e consumo de substrato obtidos durante a etapa de fermentação dos experimentos foram usados para modelagem matemática das cinéticas. O estudo dos modelos matemáticos foi realizado para descrever o processo de crescimento do *Lactobacillus salivarius* e consumo de substrato na solução filmogênica probiótica que apresentou maior vantagem produtiva. Além do Statistica, o LAB Fit Curve Fitting Software (www.labfit.net) foi também usado nesse estudo das cinéticas. Foram inicialmente escolhidos seis modelos primários para descrever o crescimento das células e o consumo do substrato na solução filmogênica probiótica, a seguir descritos.

4.2.2.1. Modelo de Baranyi

O modelo de Baranyi (BARANYI; ROBERTS, 1994), com 5 parâmetros, foi um dos modelos utilizados para estimar os parâmetros cinéticos de crescimento do *Lactobacillus salivarius* nas soluções filmogênicas em condições isotérmicas, e prever o consumo de substrato. Tal modelo é dado conforme a Equação (4):

$$A(t) = A_0 + \mu_{\max} F(t) - \ln \left(1 + \left(\frac{\exp(\mu_{\max} F(t)) - 1}{\exp(A_m - A_0)} \right) \right) \quad (4)$$

em que: $A(t)$ é a concentração de células (LogUFC mL⁻¹) ou concentração de carboidratos redutores (%) no instante de tempo t ; A_0 é a concentração mínima de células (LogUFC mL⁻¹) ou conteúdo mínimo de carboidratos redutores (%). A_m é a concentração máxima de células (LogUFC mL⁻¹) ou conteúdo máximo de carboidratos redutores (%); μ_{\max} é a taxa máxima de crescimento ou consumo de substrato (h⁻¹). Para o modelo de Baranyi, a função $F(t)$ é definida pela Equação 5:

$$F(t) = t + \frac{1}{v} \ln \left(\exp(-vt) + \exp(-h_0) - \exp(-vt - h_0) \right) \quad (5)$$

em que: h_0 é igual a $\mu_{\max} \lambda$, e λ é a duração da fase lag, v é a taxa máxima de consumo do substrato limitante, assumida como sendo igual a μ_{\max} (JUNEJA et al., 2009).

4.2.2.2. Modelo de Gompertz

O modelo de Gompertz (GOMPertz, 1825), com 3 parâmetros, é dado conforme a Equação 6:

$$A(t) = A_m \exp\left[-\exp\left(-\mu_{\max}(t-I)\right)\right] \quad (6)$$

em que I é o tempo (h) no qual a taxa de crescimento ou de consumo de substrato é máxima.

4.2.2.3. Modelo de Gompertz Generalizado

O modelo de Gompertz generalizado (HENDERSON, SEABY, SOMES, 2006), com 4 parâmetros, é dado através da Equação 7:

$$A(t) = A_0 + (A_m - A_0) \exp\left[-\exp\left(-\mu_{\max}(t-I)\right)\right] \quad (7)$$

4.2.2.4. Modelo Logistic

O modelo Logistic (PEARL; REED, 1920), com 3 parâmetros, é dado conforme a Equação 8:

$$A(t) = \frac{A_m}{1 + \exp\left(-\mu_{\max}(t-I)\right)} \quad (8)$$

4.2.2.5. Modelo Logistic Modificado

O modelo Logistic modificado (ZWIETERING et al., 1990), com 4 parâmetros, é dado pela Equação 9:

$$A(t) = A_0 + \frac{A_m}{1 + \exp\left(\frac{4 \times \mu_{\max}(\lambda - t)}{A_m} + 2\right)} \quad (9)$$

4.2.2.6. Modelo Weibull

O modelo Weibull (WEIBULL, 1951), com 4 parâmetros, é dado através da Equação 10:

$$A(t) = A_m - (A_m - A_0) \exp\left[-(k_1 t)^{\delta_1}\right] \quad (10)$$

em que: k_1 , dado em h^{-1} , é o parâmetro que governa a taxa na qual a variável de resposta se aproxima do seu potencial máximo; e δ_1 é uma constante alométrica. Essa constante é um parâmetro que controla a ordenada t (tempo de fermentação) para o ponto de inflexão em que, assumindo-se o valor igual a 1, o modelo de Weibull é uma curva exponencial. Porém, para $\delta_1 > 1$, o modelo de Weibull é uma curva sigmoidal (HENDERSON, SEABY, SOMES, 2006).

Os parâmetros das funções apresentadas, bem como os indicadores estatísticos, foram determinados por regressão não linear usando o método dos mínimos quadrados, utilizando-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt.

4.2.3. Validação dos modelos aplicados ao crescimento celular e consumo de substrato

O ajuste dos modelos primários apresentados anteriormente aos dados experimentais das cinéticas de fermentação do *Lactobacillus salivarius* foi avaliado considerando-se o coeficiente de determinação (R^2), o qui-quadrado (χ^2), e o Student's t-test para cada parâmetro determinado. Os valores preditos pelos modelos foram comparados com os valores experimentais através dos testes fator de viés (FV) e fator de precisão (FP) (ROSS, 1996; WANG et al., 2017), que são dados conforme as Equações 11 e 12:

$$FV=10 \frac{\sum_{i=1}^n \text{Log}\left(\frac{\text{Experimental}}{\text{Predito}}\right)}{n} \quad (11)$$

$$FP=10 \frac{\sum_{i=1}^n \left| \text{Log}\left(\frac{\text{Predito}}{\text{Experimental}}\right) \right|}{n} \quad (12)$$

em que: n é o número total de dados experimentais.

O indicador estatístico fator de viés (FV) é uma medida da variação média entre o valor experimental e o valor predito pelo modelo. Já o indicador fator de precisão (FP) mede a diferença média entre os valores experimentais e os valores preditos, desconsiderando se a diferença é positiva ou negativa. Um valor próximo de 1 para FV e FP indica que há uma concordância entre os valores experimentais e preditos (TARLAK; OZDEMIR; MELIKOGLU, 2020).

4.3. Processamento mínimo do mamão

Os frutos foram pré-selecionados, levando em consideração características, como: cor, danos físicos, estágio de maturação, qualidade da casca e tamanho. Posteriormente, os frutos foram lavados em água corrente para remoção de sujidades oriunda do mercado e sanitizados em solução de hipoclorito de sódio na concentração de 200 ppm durante 15 min. Após sanitização, os frutos foram descascados e cortados em fatias de 5 mm de espessura, utilizando-se utensílios de aço inoxidável. O fruto foi avaliado *in natura* quanto as características físico-químicas descritas no Item 3.26.

4.4. Revestimento das fatias de mamão

Conhecida as condições ótimas para obter uma solução filmogênica com alta concentração de células probióticas, foi produzida a solução filmogênica probiótica ideal (1% de gelatina, 4% de inulina, temperatura de fermentação de 45 °C) para o processo de revestimento das fatias de mamão. Essas fatias foram organizadas em bandejas teladas de alumínio de forma a não ocorrer o contato entre as fatias. Nas bandejas, as fatias de mamão foram revestidas por aspersão com a solução filmogênica probiótica. O excesso da solução foi drenado com o objetivo de evitar a formação de grânulos na formação do filme. As fatias de mamão foram mantidas à temperatura de 10 ± 2 °C até observado a completa secagem da solução e formação do filme revestindo as fatias de mamão.

4.5. Secagem

As fatias de mamão revestidas foram desidratadas em estufa de secagem com circulação de ar forçada e temperatura ajustável. A eficiência da secagem foi analisada quanto a influência do revestimento probiótico comparado à amostra controle (sem revestimento) sob o efeito de diferentes temperaturas. Para isso, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 2×3 , no qual foram

considerados dois tratamentos: controle e com aplicação do revestimento probiótico; e três temperaturas: 50, 60 e 70 °C, totalizando seis experimentos (Tabela 2).

Tabela 2. Esquema fatorial 2×3 para análise das condições de processo: tratamento e temperatura de secagem.

Experimentos	Condições de processo	
	Tratamento	Temperatura (°C)
I	Controle	50,0
II	Revestimento probiótico	50,0
III	Controle	60,0
IV	Revestimento probiótico	60,0
V	Controle	70,0
VI	Revestimento probiótico	70,0

Os experimentos de secagem foram realizados em triplicata com as amostras pesadas em intervalo de tempo regulares até atingir peso constante. Com os dados de perda de massa das amostras durante as secagens, foi calculado a razão do teor de água através da Equação 13:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (13)$$

em que: X é o teor de água (b.s.); X₀ corresponde ao teor de água inicial (b.s.); X_e é o teor de água de equilíbrio (b.s.) e X* é a razão do teor de água.

Durante o processo de secagem, foram feitas coletas de amostras inicialmente a cada 30 min e posteriormente a cada 60 min para análise da viabilidade do probiótico, encolhimento e alterações qualitativas da cor das fatias de mamão. Dos dados coletados, foram geradas curvas representativas dos efeitos da temperatura e tempo de secagem na qualidade do produto desidratado.

As amostras foram acondicionadas em embalagens laminadas flexíveis multicamadas (PET/AL/PE), até o momento das análises.

4.6. Viabilidade da cultura probiótica

A contagem de células viáveis foi realizada em microscópio óptico pelo método de contagem direta em Câmara de Neubauer. Para determinação da concentração de células, foram realizadas diluições seriadas da amostra até a obtenção de um número ideal para contagem. Uma alíquota da suspensão de células diluída foi coletada e por diferença de capilaridade o espaço correspondente entre a Câmara de Neubauer e a lamínula foi preenchido. Posteriormente, a câmara foi posicionada no microscópio óptico e a contagem efetuada.

A Câmara de Neubauer é formada por 9 quadrantes, utilizados para determinar a concentração de células em um determinado volume fluido. A área total compreendida pelos 9 quadrantes é de 9 mm², sendo que cada quadrante possui dimensões de 1×1 mm. Ao ser colocada à lamínula, a distância da mesma até a lâmina (profundidade) mede 0,1 mm, permitindo obter-se um volume de 0,1 mm³ em cada quadrante. Desta forma, a concentração de células na amostra será determinada através da Equação 14:

$$N_{\text{Cel}} = \frac{N \times d}{S_c \times P \times 1} \quad (14)$$

em que: N_{Cel} corresponde a concentração de células (UFC mL⁻¹); N é o número de células contadas; d é o fator de diluição; S_c corresponde a área da superfície contada e P é a profundidade da câmara.

4.7. Modelagem matemática da cinética de secagem

As curvas de secagem foram construídas a partir da relação entre a razão do teor de água e o tempo de secagem. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, foi realizada análise de regressão não linear, pelo método Quase-Newton, utilizando-se o programa computacional Statistica 7.0 (STATSOFT; INC., 2005). Os modelos matemáticos usados encontram-se sumarizados na Tabela 3.

O ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais das cinéticas de secagem das fatias de mamão foi avaliado considerando-se o coeficiente de determinação (R^2), o qui-quadrado (χ^2), e também o Student's t-test para cada parâmetro determinado.

Tabela 3. Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem das fatias de mamão.

Modelo	Expressão empírica	Referência	Equação
Henderson e Pabis	$X^* = a \cdot \exp(-b \cdot t)$	Diamante et al. (2010)	(15)
Peleg	$X^* = 1 - t / (a + bt)$	Mercali et al. (2010)	(16)
Page	$X^* = \exp(-a \cdot t^b)$	Diamante et al. (2010)	(17)
Silva et alii	$X^* = \exp(-a \cdot t - b\sqrt{t})$	Silva et al. (2013)	(18)
Wang e Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh (1978)	(19)

4.8. Teor de água

O teor de água dos frutos de mamão *in natura* e das fatias após o processo de secagem foi determinado segundo o método 934,06 da AOAC (1990).

4.9. Modelo de difusão

Assumindo que as fatias de mamão se comportam como um sólido homogêneo e isotrópico, cuja distribuição inicial da umidade é uniforme, e que a difusão líquida é o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido, foi definido o modelo mais adequado para definir a difusão de água nas fatias de mamão. Além disso, supõe-se que as dimensões do sólido não apresentaram variações durante a difusão, assim como a difusividade efetiva. O coeficiente de transferência de massa convectiva foi considerado constante durante a difusão (SILVA et al., 2010).

Considerando que as fatias de mamão apresentavam uma espessura muito menor que as outras dimensões da fatia previamente estabelecidas nos experimentos, a geometria considerada para o produto foi uma parede infinita. Assim, foi estudado condições de contorno (prescrita e convectiva) como solução analítica da equação de difusão.

4.9.1. Condição de contorno do primeiro tipo

Em uma condição de contorno do primeiro tipo, a distribuição da temperatura sobre a superfície do corpo a qualquer momento é prescrita (LUIKOV, 1968), conforme Equação 20:

$$T_s(t) = f(t) \quad (20)$$

em que: $T_s(t) = T_a = \text{constante}$ é a temperatura na superfície do corpo.

Essa condição pode ser alcançada pelo controle especial da temperatura.

A condição de contorno do primeiro tipo (prescrita) foi avaliada através do processo de otimização, o qual foi feito usando o programa “Prescrito” (SILVA; SILVA, 2009a). A solução analítica de primeiro tipo para a geometria de parede infinita encontra-se descrita na Equação 21:

$$X(t) = X_e - (X_e - X_0) \sum_{n=0}^{200} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D}{L^2} t\right] \quad (21)$$

em que: X é o teor de água no instante t ; X_e é o teor de água para $t \rightarrow \infty$ e X_0 é o teor de umidade para $t = 0$; L é a espessura; D corresponde a difusividade e t é o tempo.

4.9.2. Condição de contorno do terceiro tipo

Silva e Silva (2009b) explicaram que a condição de contorno convectiva, também chamada de condição de contorno do terceiro tipo ou ainda condição de contorno de Cauchy, é expressa pela imposição de fluxo difusivo interno igual na fronteira do sólido e fluxo convectivo externo próximo a esta fronteira. Assim, para a condição de contorno do terceiro tipo, a solução analítica da equação de difusão é dada pelas séries mostradas na Equação 22 (LUIKOV, 1968), na qual apenas os 16 primeiros termos da série infinita foram usados:

$$X(t) = X_e - (X_e - X_0) \sum_{n=1}^{16} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{(L/2)^2} t\right) \quad (22)$$

em que: o coeficiente B_n é dado pela Equação 23:

$$B_n = \frac{2B_i^2}{\mu_n^2 (B_i^2 + B_i + \mu_n^2)} \quad (23)$$

em que: B_i é o número de Biot de transferência de massa, dado pela Equação 24:

$$B_i = \frac{h(L/2)}{D} \quad (24)$$

em que: o parâmetro h é o coeficiente convectivo de transferência de massa. Nas últimas equações, μ_n são as raízes da Equação 25 sendo chamada de equação característica para a parede infinita:

$$\cot\mu = \frac{\mu}{B_i} \quad (25)$$

A condição de contorno do terceiro tipo foi usada para calcular o número de Biot de transferência de massa em relação à secagem, dispensando uma estipulação prévia. Desse modo, a Equação 22 foi ajustada aos dados experimentais conforme a metodologia de otimização proposta por Silva et al. (2010) e a otimização foi realizada utilizando o software "Convective" (SILVA; SILVA, 2009b).

4.10. Energia de ativação e propriedades termodinâmicas

Através da Equação de Arrhenius (Equação 26) foi determinado a relação da difusividade com as temperaturas usadas no processo de secagem das fatias de mamão.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (26)$$

em que: D_0 é uma constante chamada de fator pré-exponencial; R é a constante universal dos gases ideais ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$). O ajuste da Equação 26 aos valores de difusividade obtidos em diferentes temperaturas possibilita a determinação da energia de ativação (E_a).

A determinação da energia de ativação permitiu o cálculo das diferentes propriedades termodinâmicas como entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, utilizando o método descrito Jideani e Mpotokwana (2009), conforme as Equações 27, 28 e 29:

$$\Delta H = E_a - R(T + 273,15) \quad (27)$$

$$\Delta S = R \left[\ln D_0 - \ln \left(\frac{k_b}{h_p} \right) - \ln (T + 273.15) \right] \quad (28)$$

$$\Delta G = \Delta H - (T + 273.15) \times \Delta S \quad (29)$$

em que: ΔH é entalpia específica (J mol^{-1}); E_a é a energia de ativação (J mol^{-1}); ΔS é entropia específica (J mol K^{-1}); ΔG é a energia livre de Gibbs (J mol^{-1}); k_b é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$); h_p é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$); T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Através da linearização da Equação de Arrhenius foi possível obter o coeficiente $\ln D_0$ da expressão de entropia (ΔS), em que foi utilizada a seguinte expressão, dada conforme a Equação 30:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{(T + 273,15)} \quad (30)$$

4.11. Determinação do encolhimento

A contração do volume a granel (ξ_v) foi calculada a partir da razão entre o volume instantâneo (V_t) e o volume inicial (V_0) das amostras durante a secagem, através da Equação 31:

$$\xi_v = \frac{V_t}{V_0} \quad (31)$$

Os volumes inicial e instantâneo foram calculados a partir de medidas dimensionais (x , y , z), utilizando-se paquímetro digital.

4.12. Parâmetros de cor

As amostras foram analisadas frescas e secas, utilizando um Colorímetro Delta Color (Delta Vista d.0) do tipo refletância, o qual foi previamente calibrado, com fonte de iluminação de D65 e ângulo de observação de 10° , em que foram analisados os parâmetros L^* , a^* , b^* , C^* e h° . As diferenças individuais nos valores L^* , a^* , b^* de cada

tratamento em diferentes condições de secagem em relação à cor do mamão fresco foram avaliadas pela diferença de cor total (ΔE), que foi determinada conforme Equação 32:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (32)$$

em que: L_0^* , a_0^* e b_0^* representaram a leitura do mamão fresco e L^* , a^* e b^* representaram as leituras individuais instantâneas ao fim da secagem.

Durante o processo de secagem, foi analisado qualitativamente o aspecto visual em termos de alterações na coloração e estrutura das fatias de mamão. As alterações no aspecto visual das fatias de mamão foram registradas em imagens com intervalos de tempo predefinidos.

4.13. Perfil de textura

A análise de perfil de textura (TPA) foi realizada com o analisador de textura TA XT Plus (Stable Micro System). Para a obtenção dos parâmetros foi empregado o teste de resistência à compressão com o auxílio do probe P/20R, cilindro de alumínio com diâmetro de 20 mm a uma tensão de 40% sobre a amostra.

Foram analisados os atributos: firmeza (N), coesividade, gomosidade e mastigabilidade, seguindo a metodologia de Giongo et al. (2019).

4.14. Reidratação

A reidratação do mamão seco foi determinada utilizando amostras de aproximadamente 1 g. As amostras foram imersas em 20 mL de água destilada a 25 ° C durante 300 min. No fim do período de reidratação, as amostras foram retiradas e removido o excesso de água superficial. Então o peso das amostras reidratadas foi determinado. A taxa de reidratação (TR) foi calculada conforme é dado pela Equação 33 (DOYMAZ, 2017):

$$TR = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (33)$$

em que: W_1 é a massa da amostra seca; W_2 é a massa da amostra reidratada.

4.15. Densidade aparente

A densidade aparente ρ_a (g cm^{-3}), foi determinada em triplicata segundo o método de deslocamento de tolueno ou n-heptano descrito por Yan, Sousa-Gallagher e Oliveira (2008), com modificações. Utilizou-se um frasco calibrado usando água destilada e seu volume foi determinado como sendo 100 mL. O óleo vegetal de soja foi utilizado como solvente substituto do tolueno ou n-heptano. A densidade do óleo vegetal de soja encontrada foi de $0,80 \text{ g cm}^{-3}$. As amostras como peso conhecido, foram transferidas para um frasco cheio até a metade com o óleo vegetal. O volume do frasco foi então completado com o óleo vegetal, o nível de solvente sendo cuidadosamente ajustado para garantir a consistência dos resultados, e pesado. O volume da amostra foi calculado conforme Equação 34:

$$V = V_f - \frac{M_{t+s} - M_f - M}{\rho_{\text{solvente}}} \quad (34)$$

em que: V é o volume da amostra; V_f é o volume do frasco; M_{t+s} é a massa do frasco mais a amostra e o solvente; M_f é a massa do frasco, M é a massa do solvente e ρ_{solvente} é a densidade do óleo vegetal.

A densidade aparente ρ_a (g cm^{-3}) das fatias de mamão *in natura* e secas foram determinadas conforme Equação 35:

$$\rho_a = \frac{W_2}{V} \quad (35)$$

4.16. Densidade sólida

A densidade sólida, ρ_s (g cm^{-3}), das fatias de mamão foi calculada pela Equação 36:

$$\rho_s = \frac{1 + X_{\text{amostra}}}{\frac{1}{\rho_a} + \frac{X_{\text{amostra}}}{\rho_w}} \quad (36)$$

em que: ρ_w é a densidade de água e X_{amostra} é o teor de água.

4.17. Porosidade

A porosidade (ε %) foi calculada mediante a determinação da densidade aparente ρ_a e densidade sólida ρ_s das fatias de mamão, conforme é dado na Equação 37:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (37)$$

4.18. Características físico-químicas

4.18.1. pH e acidez total titulável

Para determinação do pH, as amostras foram maceradas em amolfariz e diluída na proporção 1:10 de fruta/água destilada. A leitura do pH foi realizada em um pHmetro, previamente calibrado com soluções tampões de 7,0 e 4,0 à temperatura de 20 °C (método 981,12). A amostra macerada e diluída serviu para a determinação da acidez, a qual foi determinada por meio da titulação da amostra com solução de hidróxido de sódio à 0,1N, utilizando a fenolftaleína como indicador (método 942,15) (AOAC, 1997). Os resultados obtidos da determinação da acidez foram expressos em % de ácido cítrico.

4.18.2. Sólidos solúveis totais

O teor de sólidos solúveis foi determinado através de leitura direta em °Brix utilizando o refratômetro portátil.

4.18.3. Açúcares redutores

Para quantificação dos açúcares redutores das soluções filmogênicas, aplicou-se o método proposto por Miller (1959). Foi utilizado 1000 μ L da amostra. A amostra foi adicionada 1000 μ L do Reativo DNS e 7,5 mL de água destilada. A mistura homogeneizada é aquecida a 90 °C durante 15 min. Passado o tempo de aquecimento, a leitura das absorbâncias foi realizada com as amostras em temperatura ambiente em espectrofotômetro a 575 nm. Os resultados foram expressos em porcentagem de glicose.

4.18.4. Compostos fenólicos

O conteúdo de compostos fenólicos das fatias de mamão *in natura* e secas, foi estimado a partir do método de Folin e Ciocalteu descrito por Waterhouse (2006). A curva padrão foi preparada com ácido gálico, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro

a 765nm e os resultados expressos em equivalente do ácido gálico (EAG mg por 100g⁻¹) de massa.

4.18.5. Flavonoides totais e antocianinas

Os flavonoides e as antocianinas foram determinados a partir do método descrito por Francis (FRANCIS, 1982) e as concentrações de flavonoides e antocianinas foram expressas em mg por 100g⁻¹. Utilizou-se aproximadamente 1 g da amostra e foi adicionado 10 mL da solução de etanol-HCl preparado a partir de etanol a 95 % e solução de ácido clorídrico 1,5 N, na proporção 85:15 (v/v). Em seguida as amostras foram maceradas, por um minuto, e deixadas por 24 h na geladeira; após esse período, foram centrifugadas por 5 min a 3000 rpm e as amostras foram diluídas na solução na proporção 1:1 filtrando-as em algodão. O sobrenadante foi coletado para realização da leitura a 374 e 535 nm. As concentrações de flavonoides e antocianinas foram estimadas pelas Equações 38 e 39:

$$\text{Flavonoides (mg por 100g}^{-1}\text{)} = \frac{d \times \text{Abs}}{76,6} \quad (38)$$

$$\text{Antocianinas (mg por 100g}^{-1}\text{)} = \frac{d \times \text{Abs}}{98,2} \quad (39)$$

em que: Abs corresponde ao valor da absorvância observado na leitura e d é o fator de diluição.

4.18.6. Carotenoides e clorofila total

Os teores de carotenoides e clorofila total foram determinados segundo o método proposto por Lichtenthaler (1987), com adaptações. Foi utilizado 0,5 g de amostra macerada em 6 mL de acetona 80% acrescido de 0,2 g de CaCO₃; o extrato obtido foi centrifugado a 3000 rpm por 1 min; o sobrenadante foi coletado para realização da leitura da absorvância nos comprimentos de onda de 470, 646,8 e 663,2 nm, em espectrofotômetro. O teor de carotenoides totais e clorofila total, foram expressos em mg por 100g⁻¹ de amostra.

4.19. Análise estatística

Para análise dos efeitos das variáveis independentes sobre as características físico-químicas e biológicas do *Lactobacillus salivarius*, foi utilizado a metodologia de superfície de resposta, na qual é assumido a existência de uma função polinomial que relaciona cada resposta de interesse com as variáveis independentes. O teste estatístico de análise de variância (ANOVA) foi realizado com um nível de confiança de 95%, incluindo a significância estatística de cada termo do modelo ajustável (p-value), os efeitos estimados em cada termo, e o coeficiente de determinação do modelo a fim de estabelecer a confiabilidade do modelo, usando o software Statistica 7.0 (STATSOFT; INC., 2005).

Os resultados obtidos do estudo dos efeitos do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem foram submetidos à ANOVA e realizado o teste de Tukey para comparação das médias, ao nível de 5% de significância, com auxílio do software Statistica 7.0. (STATSOFT; INC., 2005).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Otimização da fermentação com *Lactobacillus salivarius*

A Tabela 4 resume os principais resultados relacionados à otimização da fermentação com *Lactobacillus salivarius*. O crescimento de micro-organismos probióticos como o *Lactobacillus salivarius* em soluções filmogênicas abre espaço para aplicações em uma variedade de produtos alimentícios. De acordo com os resultados obtidos, na temperatura de incubação de 25 °C, o *Lactobacillus salivarius* apresentou um intervalo de tempo de duração da fase lag de aproximadamente 2 h. Esse foi o tempo sem observação apreciável do aumento do número de células, correspondendo ao período de adaptação do micro-organismo no meio de cultivo. Um período de aproximadamente 2 h foi igualmente observado por Mis Solval et al. (2019), ao estudar a cinética de crescimento do *Lactobacillus plantarum* NRRLB-4496, *Lactobacillus acidophilus* NRRLB-4495 e *Lactobacillus reuteri* B-1417 em um meio contendo hidrolisado da clara de ovo. Já Mustafa et al. (2020) observaram uma curta fase de adaptação do *Lactobacillus casei* na fermentação do suco de romã (*Punica granatum*). As curvas de crescimento do *L. salivarius* fermentado nas temperaturas de 35 e 45 °C apresentaram um período de adaptação curto (< 2 h), o que mostra uma melhor adaptação do micro-organismo às soluções filmogênicas sob essas condições de fermentação.

Na presente pesquisa, o maior crescimento do *Lactobacillus salivarius* nas soluções filmogênicas à base de gelatina e inulina ocorreu quando foram fermentadas na temperatura de 45 °C, em que se observou um aumento de aproximadamente 2 LogUFC mL⁻¹ com relação à concentração inicial de células. Nas temperaturas de 25 e 35 °C, verificou-se um aumento de aproximadamente 1 LogUFC mL⁻¹ da concentração inicial de células. A produção de células do *Lactobacillus salivarius* nas soluções filmogênicas foram inferiores ao crescimento de outros micro-organismos do mesmo gênero *Lactobacillus*. Lin et al. (2019) observaram um aumento de aproximadamente 5 LogUFC mL⁻¹ da concentração inicial de células, ao estudarem o crescimento de *Bifidobacterium* e *Lactobacillus* em leite de soja e meio MRS (Man, Rogosa e Sharpe). No entanto, o desenvolvimento de micro-organismos probióticos em diferentes meios de cultivo é influenciado por fatores extrínsecos e intrínsecos do sistema no qual é realizada a fermentação. Monteiro et al. (2020) em estudo do crescimento de células de *Lactobacillus reuteri* em polpa de maracujá, relataram um aumento do número inicial de células em 1 LogUFC mL⁻¹, quando a polpa foi fermentada a 35 °C. Esses pesquisadores mostraram a

importância do estudo das condições de fermentação e do fator limitante da composição do meio de cultivo.

Diante dos resultados obtidos no presente estudo estimou-se que, após 4 h de fermentação em condições de temperatura controlada, foi obtida a concentração máxima de células, sendo as concentrações maiores relativas aos experimentos cuja fermentação foi realizada na temperatura de 45 °C.

Na Tabela 4 encontram-se resumidas as características biológicas e físico-químicas obtidas a partir dos dados experimentais, após 4 h de fermentação das soluções filmogênicas com o *L. salivarius*. Os efeitos das variáveis independentes sobre a fermentação com *L. salivarius* nas soluções filmogênicas mostraram que a temperatura de incubação, durante a fermentação, influenciou na população de células nas soluções filmogênicas, independente das concentrações de gelatina (Figura 3a) e inulina (Figura 3b). Para as condições experimentais desta pesquisa, o efeito significativo da temperatura propõe que a fermentação alcança o máximo de células probiótica quando o processo ocorre a 45 °C, que é a temperatura mais indicada para o crescimento do *L. salivarius*.

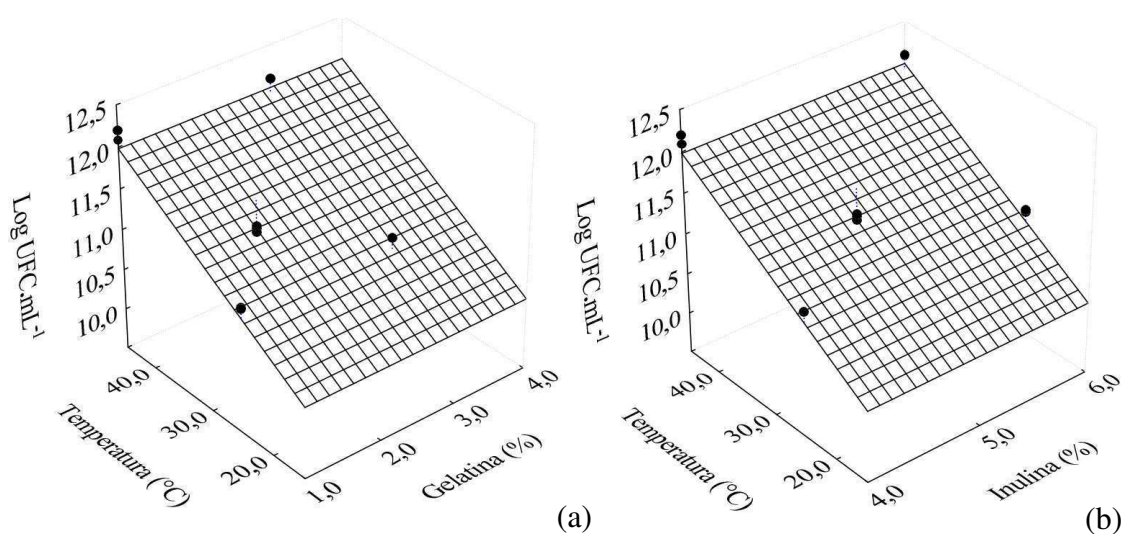


Figura 3. Superfícies de resposta aos efeitos da temperatura na concentração máxima de células em relação a: (a) concentração de gelatina; (b) concentração de inulina.

Tabela 4. Características biológicas e físico-químicas das soluções filmogênicas fermentadas com *Lactobacillus salivarius*, após 4 horas de fermentação.

Parâmetros	Unidade	Experimentos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Concentração máxima de células	LogUFC mL ⁻¹	11,05	11,06	11,03	11,06	12,20	12,09	12,08	12,09	11,09	11,05	11,13
Taxa máxima de crescimento (μ_{\max})	h ⁻¹	0,54	0,54	0,54	0,54	0,30	0,30	0,30	0,30	0,27	0,27	0,27
Tempo de geração	h	1,28	1,28	1,28	1,28	2,31	2,34	2,34	2,34	2,54	2,56	2,54
Rendimento celular ($Y_{x/s}$)	LogUFC (mLg) ⁻¹	7,69	4,56	9,17	4,36	15,59	6,20	15,56	7,11	13,48	14,45	11,38
pH	-	5,63	5,47	5,53	5,47	5,40	5,53	5,43	5,43	5,77	5,90	5,80
Sólidos solúveis totais	°Brix	6,00	7,97	7,20	9,43	5,60	7,40	7,20	9,00	7,00	7,00	7,40
Carboidratos Redutores	%	1,27	1,10	1,71	1,41	1,22	1,06	1,59	1,41	1,39	1,42	1,41

Médias experimentais.

A Equação 40, mostra o efeito estatisticamente significativo da temperatura sobre a concentração de células probióticas nas soluções filmogênicas.

$$\begin{aligned} \text{LogUFC mL}^{-1} &= 9,58 + 0,0532 \times T \\ R^2 &= 0,806 \end{aligned} \quad (40)$$

em que: LogUFC mL⁻¹ representa a concentração máxima de células, e T é a temperatura (°C).

A temperatura de fermentação influenciou significativamente a taxa máxima de crescimento do *Lactobacillus salivarius* nas soluções filmogênicas. Dessa forma, foi observado que, ao aumentar a temperatura de 25 para 45 °C, a taxa máxima de crescimento diminuiu. Na Equação 41 é dado o modelo que descreve o efeito da temperatura sobre a taxa máxima de crescimento do *Lactobacillus salivarius* nas soluções filmogênicas.

$$\begin{aligned} \mu_{\max} &= 0,804 - 0,012 \times T \\ R^2 &= 0,716 \end{aligned} \quad (41)$$

Monteiro et al. (2020) ao estudarem o crescimento do *Lactobacillus reuteri* na polpa de maracujá, observaram que a taxa máxima de crescimento celular variou de 0,009 a 0,097 h⁻¹, conforme a influência do pH da polpa de maracujá e da temperatura de fermentação. Mestres et al. (2019) estudando a modelagem da fermentação mista de gowé (bebida Beninense fermentada feita com farinha de sorgo maltado e não maltado), usando *Lactobacillus plantarum* e linhagem *Pichia kluyveri*, verificaram uma taxa máxima de crescimento de *Pichia kluyveri* de 0,73 h⁻¹. Para tal, os pesquisadores usaram o modelo Logistic para determinar essa taxa. Por outro lado, Mechmeche et al. (2017) ao analisarem a cinética e estudaram a modelagem matemática para determinação de parâmetros de crescimento de *Lactobacillus plantarum* em isolado rico em proteína de semente de tomate, observaram uma taxa máxima de crescimento de 0,169 h⁻¹ (no isolado proteico de sementes de tomate), e de 0,363 h⁻¹ (no caldo MRS). A literatura citada mostra a influência de diversos fatores na taxa de crescimento de diferentes micro-organismos. No presente estudo, foi constatado, na Tabela 4, uma variação da taxa de crescimento de 0,27

a $0,54 \text{ h}^{-1}$ nos experimentos realizados nas temperaturas de 35 e 25 °C, respectivamente. Esse efeito é percebido nas Figuras 4a e 4b.

Em condições ideais, as bactérias são os micro-organismos com maior taxa de crescimento e podem ter um tempo de geração (t_g) inferior a 1 h (MONTEIRO et al. 2020). O tempo de geração, que é o parâmetro que fornece o tempo necessário para duplicação da população de células nesse estudo, variou de 1,28 a 2,56 h. O tempo de geração e o pH não foram estatisticamente significativos para os efeitos das variáveis independentes no processo de fermentação das soluções filmogênicas.

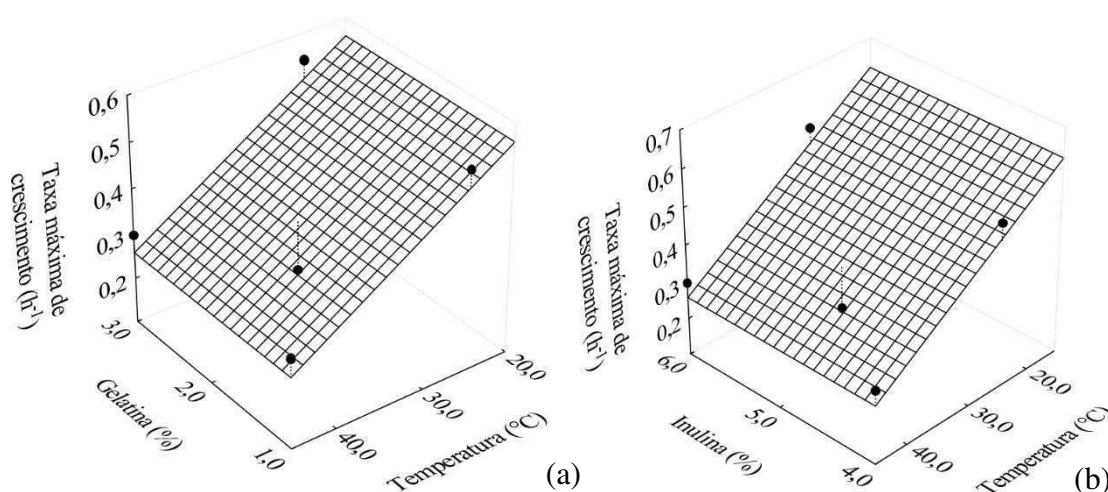


Figura 4. Superfícies de resposta aos efeitos da temperatura na taxa máxima de crescimento celular em relação a: (a) concentração de gelatina; (b) concentração de inulina.

O rendimento celular $Y_{x/s}$, que representa a massa celular produzida pela quantidade do substrato consumido, teve efeito da concentração de gelatina, visto que, o aumento da concentração de gelatina nas soluções filmogênicas resultou na redução do rendimento de células (Figuras 5a e 5b). As soluções com 3% de gelatina na formulação resultaram em soluções filmogênicas visualmente mais consistente, aproximando-se ao estado semissólido, o que pode se tornar uma barreira para o crescimento do micro-organismo. O modelo com coeficientes de regressão estatisticamente significativo é apresentado na Equação 42. A influência da gelatina no modelo que representa o rendimento celular obteve um coeficiente de determinação de 0,852 porém, ao parametrizar, o coeficiente de determinação baixou para 0,653. Embora a parametrização

tenha implicado na diminuição do coeficiente de determinação, esse recurso foi adotado, visando eliminar os efeitos de parâmetros não significativos para o rendimento celular.

$$Y_{x/s} = 12,432 - 0,068 \times G \quad (42)$$

$$R^2 = 0,653$$

em que: G é representa a concentração de gelatina nas soluções filmogênicas (%).

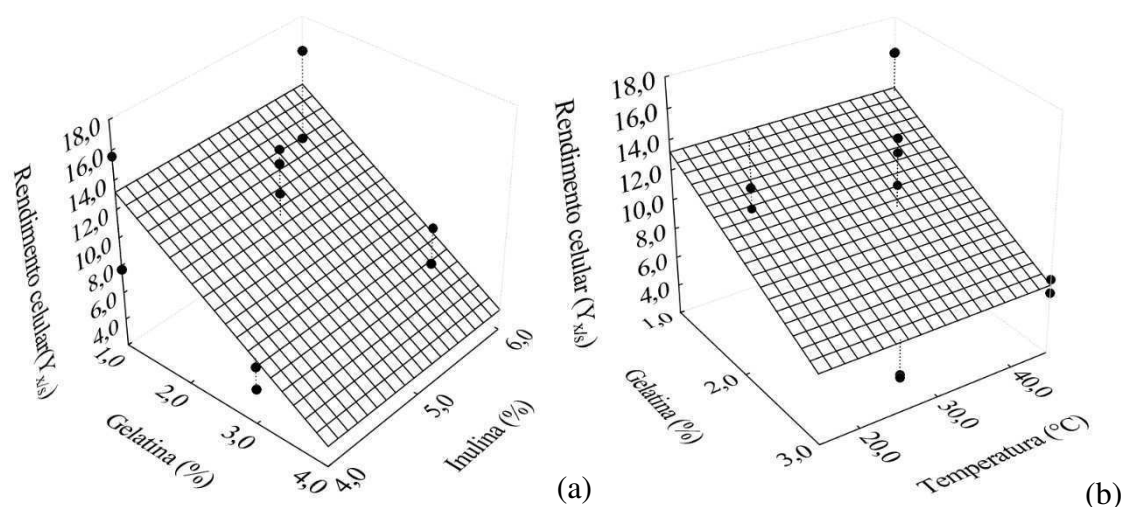


Figura 5. Superfícies de resposta aos efeitos da concentração de gelatina no rendimento celular em relação a: (a) inulina; (b) temperatura.

Parâmetros físico-químicos das soluções filmogênicas foram determinados com o objetivo de avaliar o potencial dessas soluções para a incorporação de probióticos em alimentos (Tabela 4). O pH é um dos principais fatores que influenciam no crescimento de micro-organismos. Inicialmente, o pH das soluções foram entre 5,6 e 5,9, e a variação do pH pode ter sido influenciada conforme a composição. Após 4 h de fermentação, as soluções filmogênicas apresentaram pHs entre 5,4 e 5,9 (Tabela 4). O *Lactobacillus salivarius* cresce em pH ótimo na faixa de 5,5 a 6,5 (SAYAN et al., 2018). Vale salientar que as soluções filmogênicas à base de gelatina e inulina apresentaram pHs dentro da faixa indicada como ideal, possibilitando o bom desenvolvimento do *L. salivarius*.

Conforme a Tabela 4, após as 4 h de fermentação, os sólidos solúveis variaram de acordo com a concentração de gelatina e inulina. Esses compostos em grande parte são constituídos por carboidratos e ácidos orgânicos, além de outros constituintes. Os sólidos solúveis constituem uma importante resposta do processo de fermentação, e sua

quantidade é influenciada pelo consumo de carboidratos e produção de ácidos orgânicos, como o láctico.

A concentração dos açúcares redutores foi quantificada nas soluções filmogênicas, após 4 h de fermentação, obtendo-se valores entre 1,06 e 1,71%, conforme a Tabela 4. Os açúcares redutores são açúcares livres, e a sua presença nas soluções filmogênicas favoreceram o desenvolvimento das bactérias do ácido láctico, que utilizaram os açúcares livres como principal fonte de energia. Esses valores são diferentes da quantidade de açúcares redutores encontrados em leite (4,49 g de lactose por 100 g) (OHLSSON et al., 2017) e em frutas como o maracujá (4,86 g de glicose por 100 g) (MONTEIRO et al., 2020) que têm sido estudados para a produção de alimentos probióticos. No entanto, a inulina é um prebiótico bastante estudado, atuando como substrato para o desenvolvimento de micro-organismo, possibilitando um ambiente propício para o crescimento do *L. salivarius* nas soluções filmogênicas.

As concentrações de inulina e gelatina resultaram em variações significativas nos sólidos solúveis totais e nos açúcares redutores nas soluções filmogênicas (Figuras 6a e 6b).

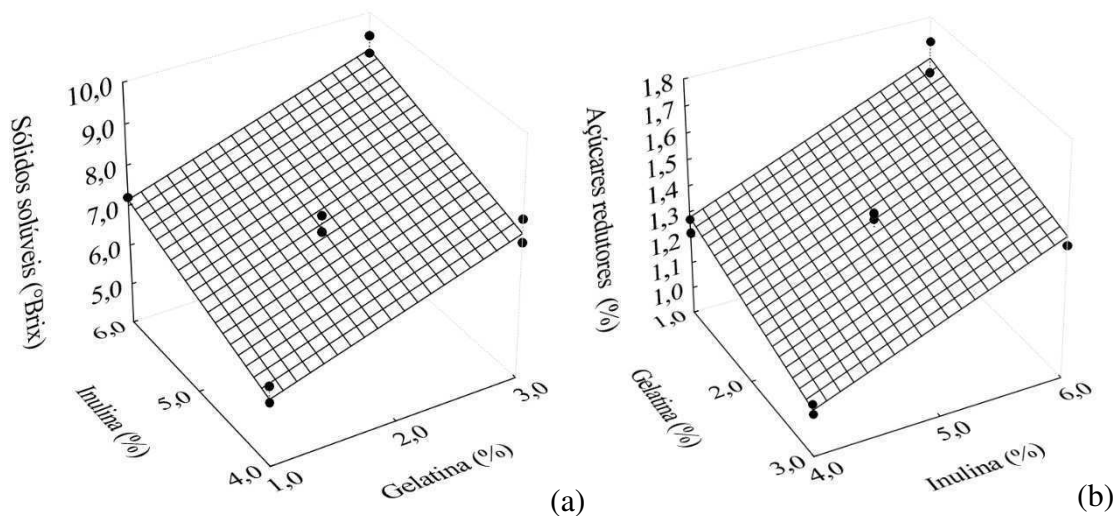


Figura 6. Superfícies de resposta aos efeitos da concentração de gelatina e inulina em relação a: (a) sólidos solúveis totais; (b) açúcares redutores.

Na Figura 6a é possível constatar que o aumento da concentração de inulina e gelatina resultou no aumento dos sólidos solúveis. É interessante mencionar que o maior conteúdo de açúcares redutores foi observado para a maior concentração de inulina combinada com a menor concentração de gelatina. Foi observado que o aumento da

concentração de gelatina sucedeu em interações entre a gelatina e inulina que podem ter interferido na disponibilidade do substrato para crescimento do *Lactobacillus salivarius*. As Equações 43 e 44 mostram os modelos polinomiais com coeficientes de regressão estatisticamente significativos para os efeitos da concentração de gelatina e inulina sobre os sólidos solúveis totais e açúcares redutores, respectivamente.

$$\begin{aligned} SS &= 6,4972 + 0,0145 \times G + 0,0098 \times In \\ R^2 &= 0,763 \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} AR &= 1,3373 - 0,0024 \times G + 0,0031 \times In \\ R^2 &= 0,889 \end{aligned} \quad (44)$$

em que: AR representa a conteúdo de açúcares redutores (%), In é a concentração de inulina (%) e SS representa os sólidos solúveis (°Brix).

O estudo das concentrações de gelatina e inulina, assim como a temperatura de fermentação das soluções filmogênicas, através da metodologia de superfície de resposta, proporcionou a otimização do processo de fermentação com *L. salivarius*. Os resultados obtidos mostraram que as condições mais indicadas para a elaboração de soluções filmogênicas probiótica foram as seguintes: 1% de gelatina, 4% de inulina e fermentado na temperatura de 45 °C (Experimento 5). Essas condições foram definidas conforme respostas obtidas para as características físico-químicas e biológicas das soluções filmogênicas probiótica que foram estatisticamente significativas para, pelo menos, uma variável independente. A solução filmogênica obtida no Experimento 5, apresentou inicialmente um teor de açúcares redutores de 1,35% e após as 4 h de fermentação o teor de açúcares redutores da solução foi de 1,22% (Tabela 4), o que significa que em 4 h de fermentação aproximadamente 9,6% dos açúcares redutores presente na solução foram consumidas pelo *L. salivarius*. Segundo Ren, Zentek e Vahjen (2019) a maior atividade metabólica para a cepa de *L. salivarius* foi observada quando estudado a utilização de maltose, rafinose, sacarose e glicose como substratos preferidos. Nesse estudo, foi utilizado o frutano do tipo inulina como substrato.

5.2. Modelagem matemática: Crescimento celular e consumo de substrato

A modelagem matemática em um processo fermentativo possui um papel significativo devido à garantia de controle do processo, produção econômica e aumento da qualidade do produto, uma vez que os modelos matemáticos são usados para descrever o processo de produção sob diferentes condições de fermentação (GERMEC et al., 2018). Esses modelos matemáticos foram escolhidos com base na literatura e frequentemente são utilizados para descrever tanto o crescimento celular quanto o consumo de substrato. O modelo de Baranyi, assim como os modelos de Gompertz, Logistic e Weibul, são alguns dos mais utilizados para prever dados experimentais e parâmetros de significado biológico das fermentações.

Costa et al. (2020), Martins et al.(2020) e Tarlak, Ozdemir e Melikoglu (2020) utilizaram em seus trabalhos o modelo de Baranyi para estimar parâmetros de significado biológico relativos (1) ao crescimento de *Lactobacillus sakei* e a sua capacidade inibitória contra *Listeria monocytogenes* em meio de cultivo; (2) à quantificação de bactérias do ácido láctico em amostras de carne cozida em embalagem a vácuo; e (3) à cinética de crescimento de *Pseudomonas* spp. em cogumelos (*Agaricus bisporus*) em condições isotérmicas e não isotérmicas, respectivamente. Com o ajuste do modelo de Baranyi a dados experimentais, esses autores estimaram a taxa máxima de crescimento celular, o tempo de duração da fase lag e a população máxima de células.

Os modelos de Gompertz e Gompertz Generalizado foram utilizados por Germec et al. (2018) para ajustar o crescimento celular na formação do produto e o consumo de açúcar da fermentação de ácido láctico (LA) em lote em biorreator de tanque agitado com extrato de alfarroba. Os modelos apresentaram um bom ajuste aos dados da produção de biomassa, com coeficientes de determinação próximos de 1,00 para ambos os modelos.

Munanga et al. (2016) quando estudaram a modelagem da fermentação láctica de gowé (uma bebida Beninense fermentada feita com farinha de sorgo maltado e não maltado que é produzida por fermentação espontânea que envolve culturas mistas de bactérias do ácido láctico e leveduras), obtiveram um bom ajuste do modelo Logistic aos dados experimentais de crescimento do *Lactobacillus brevis* e *Lactobacillus plantarum* durante a fermentação. Por outro lado, o modelo Logistic Modificado foi usado por Ilgin, Germec e Turhan (2019) para descrever processos fermentativos na produção de inulinase de extrato de alfarroba usando *Aspergillus nige*. Segundo esses autores, um bom ajuste desse modelo aos dados experimentais foi obtido, com coeficiente de determinação de 0,988, e ainda com fator de viés e fator de precisão de 0,95 e 1,14, respectivamente.

5.2.1. Crescimento celular

Os dados experimentais a serem analisados são referentes à curva de crescimento celular na solução filmogênica e foram obtidos nas seguintes condições: 1% de gelatina, 4% de inulina na temperatura de 45 °C (Experimento 5). Os resultados dos ajustes das funções escolhidas aos dados experimentais foram apresentados na Tabela 5.

Uma inspeção na Tabela 5 possibilita afirmar que os modelos de Baranyi, Gompertz, Gompertz Generalizado, Logistic, Logistic Modificado e Weibull apresentaram coeficientes de determinação maiores que 0,920, baixos qui-quadrados, fator de viés e fator de precisão iguais ou muito próximos de 1, indicando uma boa concordância entre os dados experimentais e os valores correspondentes previstos pelos modelos analisados. Entretanto, alguns dos parâmetros determinados para esses modelos não apresentaram significância estatística, conforme os resultados obtidos pelo Student's t-test. Como se sabe, o Student's t-test é usado em ajuste de curvas para calcular a probabilidade de um parâmetro ser zero, apesar do valor determinado no ajuste. Uma inspeção na Tabela 5 indica que, no modelo Baranyi, os parâmetros μ_{\max} e λ têm uma probabilidade de 100% de sere zero, apesar dos valores determinados no ajuste. Assim, como tais parâmetros não têm significância estatística, o modelo de Baranyi foi rejeitado para representar os dados do crescimento celular em estudo. O modelo de Gompertz tem dois parâmetros (μ_{\max} e I) com probabilidades de cerca de 2% de ser zero. Já para o modelo de Gompertz Generalizado, as probabilidades referentes aos parâmetros μ_{\max} e I são de 100% e, portanto, estes dois modelos também foram descartados na predição de dados de crescimento. Pela mesma razão, os modelos Logistic e Logistic Modificado foram descartados. Com relação ao modelo de Weibull, embora o parâmetro k_1 apresente uma probabilidade bem menor que 1%, o parâmetro δ_1 tem uma probabilidade de cerca de 71% de ser zero, apesar do valor obtido no ajuste. Assim, esse modelo também foi descartado para representar o crescimento celular. Com isso, nenhum dos seis modelos inicialmente propostos para descrever a cinética de crescimento celular pode ser recomendado para esse fim. Nesse sentido, é importante ressaltar a afirmação de Silva et al. (2020), citando Van Boekel (1996), que de um ponto de vista rigoroso, parâmetros obtidos a partir de dados experimentais sem levar em consideração os indicadores estatísticos, em particular o teste t de Student's, pode ser considerado não interpretável.

Tabela 5. Parâmetros dos modelos para o processo de crescimento celular na solução filmogênica.

(continua)

Parâmetros	Modelo Baranyi						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	10,1800 ± 0,1000	83,5850	0,0000	0,9820	0,0590	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0130 ± 0,1000	204,7630	0,0000				
μ_{\max} (h ⁻¹)	9,3420 ± 883919,2	0,0000	1,0000				
λ (h)	1,8940 ± 10199,1	0,0000	1,0000				
Parâmetros	Modelo Gompertz						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0240 ± 0,1070	112,8640	0,0000	0,9230	0,2530	1,0000	1,0030
μ_{\max} (h ⁻¹)	0,5830 ± 0,1710	3,4160	0,0190				
I (h)	-3,0250 ± 0,9360	-3,2330	0,0230				
Parâmetros	Modelo Gompertz Generalizado						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	10,1800 ± 0,0000	83,5850	0,0000	0,9820	0,0590	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0130 ± 0,0000	220,5550	0,0000				
μ_{\max} (h ⁻¹)	9,2110 ± 5247461	0,0000	1,0000				
I (h)	1,9540 ± 26231	0,0000	1,0000				
Parâmetros	Modelo Logistic						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0240 ± 0,1040	116,1060	0,0000	0,9250	0,2460	1,0000	1,0030
μ_{\max} (h ⁻¹)	0,6080 ± 0,1670	3,6330	0,0150				
I (h)	-2,7550 ± 0,8220	-3,3540	0,0200				

Tabela 5. Parâmetros dos modelos para o processo de crescimento celular na solução filmogênica.

(conclusão)

Parâmetros	Modelo Logistic Modificado						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	10,1800 ± 0,2000	51,2950	0,0000	0,9820	0,0590	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0130 ± 0,1000	220,5620	0,0000				
μ_{\max} (h ⁻¹)	23,9100 ± 976321	0,0000	1,0000				
λ (h)	1,7400 ± 10631,1	0,0000	1,0000				
Parâmetros	Modelo Weibull						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	10,1800 ± 0,1220	83,7330	0,0000	0,9820	0,0590	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0130 ± 0,0500	241,3330	0,0000				
k ₁	0,4700 ± 0,0720	6,4680	0,0030				
δ_1	5,0180 ± 12,4170	0,4040	0,7070				

A solução proposta no presente estudo foi usar o LAB Fit Curve Fitting Software para descobrir uma outra função de ajuste, usando uma característica particular deste *software*: o LAB Fit possui uma biblioteca com mais de 200 funções simples, com 1, 2, 3 e 4 parâmetros. Mais que isso, o LAB Fit dispõe de um recurso denominado “Finder”, que possibilita ajustar todas as funções de sua biblioteca a um conjunto de dados experimentais em poucos segundos, e as melhores funções são escolhidas através dos menores qui-quadrados obtidos. Assim, usando o “Finder” e estipulando funções com até 3 parâmetros de ajuste, foi obtido o seguinte resultado para os dados de crescimento: função de número 81 (Logistic, $R^2 = 0,9250$), 80 (Gompertz, $R^2 = 0,9229$) e a função de número 57, dada por $Y=A+B \times \text{EXP}(C \times X)$, $R^2 = 0,9208$. Como as duas primeiras das três funções já haviam sido descartadas, a terceira função foi melhor investigada, na tentativa de evitar parâmetros não significativos, e de aumentar o coeficiente de determinação R^2 do ajuste (e conseqüentemente, diminuir χ^2).

Os parâmetros A e B da função de número 57 têm interpretações físicas, referentes às concentrações celulares, e o parâmetro C tem relação com a taxa máxima de crescimento. Assim, foi investigado apenas o expoente 1, podendo ser explicitado em $\text{EXP}((C \times X)^1)$. Esse expoente 1, que define uma função exponencial, poderia, a priori, ser aumentado para 2 ou 3, definindo funções sigmoidais. Numa primeira investigação, foi usado o expoente 2, ao invés de 1, e o coeficiente de determinação do ajuste aumentou de 0,9208 para 0,9710. Numa segunda tentativa, foi atribuído o valor 3 para o expoente, e o coeficiente de determinação do ajuste aumentou para 0,9813. Entretanto, para que se possa resistir à tentação de aumentar ainda mais o expoente, deve-se observar que $\text{EXP}(-(0,45 \times 14)^2) = 5,78 \times 10^{-18}$. Ainda, em termos de cálculos computacionais, tem-se que $\text{EXP}(-(0,45 \times 14)^3) = 0,0$. Vale salientar que $0,45 \text{ h}^{-1}$ e 14 h são valores típicos da taxa de crescimento e do tempo experimental máximo, no presente estudo. Assim, o expoente para a função proposta neste trabalho foi estabelecido com o valor 3, e o software Statistica foi novamente usado para ajustar a função número 57, que foi reescrita na seguinte forma:

$$A(t) = A_m - (A_m - A_0) \exp(-(k_1 t)^3) \quad (45)$$

Na Tabela 6 encontram-se os resultados do ajuste do modelo proposto, (Equação 45) para a curva de crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica.

Os resultados obtidos com o ajuste do modelo proposto aos dados experimentais do crescimento celular mostraram que todos os três parâmetros têm uma probabilidade igual a 0% de serem zero e, portanto, todos os parâmetros determinados são significativos. Apesar de simples, os resultados obtidos mostraram que o modelo proposto foi o mais adequado para descrever o crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica durante a fermentação com *Lactobacillus salivarius*.

A Figura 7 apresenta o crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica durante a fermentação. Os parâmetros de validação mostraram um bom ajuste do modelo proposto aos dados experimentais de crescimento.

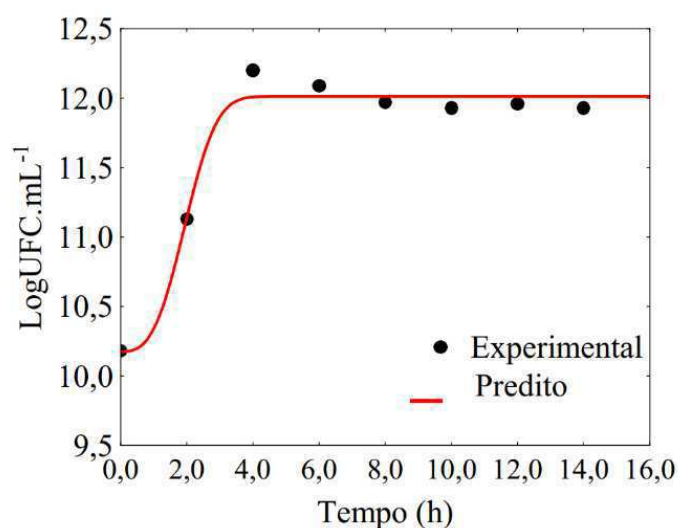


Figura 7. Curva de crescimento do *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica representada pelo do modelo proposto.

Observar-se que todas as fases do crescimento celular, exceto a fase de declínio, foram satisfatoriamente simuladas. A fase de declínio ou morte das células teve início após as 14 h de fermentação, e os dados dessa fase não foram utilizados na modelagem matemática, uma vez que não se desejava determinar parâmetros que incluíssem esse tipo de efeito biológico no presente estudo.

Para complementar as informações estatísticas relativas ao modelo proposto, a matriz de covariâncias, envolvendo os parâmetros $a_1 \equiv A_m$, $a_2 \equiv A_0$ e $a_3 \equiv k_1$, também deve ser informada.

Tabela 6. Parâmetros do modelo proposto para o processo de crescimento celular na solução filmogênica.

Parâmetros	Modelo proposto						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	10,1760 ± 0,1110	264,6680	0,0000				
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	12,0130 ± 0,0450	91,9530	0,0000	0,9810	0,0610	1,0000	1,0010
k ₁	0,4530 ± 0,0290	15,5480	0,0000				

$$\text{cov} = \begin{bmatrix} 2,06023 \times 10^{-3} & 3,70901 \times 10^{-5} & -2,75671 \times 10^{-4} \\ 3,70901 \times 10^{-5} & 1,22479 \times 10^{-2} & -1,35868 \times 10^{-3} \\ -2,75671 \times 10^{-4} & -1,35868 \times 10^{-3} & 8,47428 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (46)$$

Dessa forma, a incerteza no valor da função $A(t)$, para um dado instante t , pode ser calculada pela fórmula geral de propagação de erros (BEVINGTON et al., 1993; TAYLOR, 1997):

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial A(t)}{\partial a_j} \frac{\partial A(t)}{\partial a_k} \text{cov}(a_j, a_k)}. \quad (47)$$

Assim, com a expressão de $A(t)$ dada pela Equação 45, em LogUFC mL^{-1} , e a incerteza σ_A dada pela Equação 47, e ainda com os valores obtidos para os parâmetros dados na Tabela 7, bem como a matriz das covariâncias dada pela Equação 46, o valor de $A(t)$ para um dado instante t pode ser calculado para vários instantes, com os resultados mostrados na Figura 8.

t	A(t)	σ_A (95.4%)
0.20000E+01	0.11139E+02	0.29327E+00
0.25000E+01	0.11582E+02	0.29104E+00
0.30000E+01	0.11863E+02	0.19260E+00
0.35000E+01	0.11979E+02	0.12298E+00
0.40000E+01	0.12008E+02	0.11782E+00
0.45000E+01	0.12013E+02	0.11999E+00
0.50000E+01	0.12013E+02	0.12034E+00
0.55000E+01	0.12013E+02	0.12036E+00
0.60000E+01	0.12013E+02	0.12036E+00
0.65000E+01	0.12013E+02	0.12036E+00
0.70000E+01	0.12013E+02	0.12036E+00
0.75000E+01	0.12013E+02	0.12036E+00
0.80000E+01	0.12013E+02	0.12036E+00

Figura 8. Valores de $A(t)$ em LogUFC mL^{-1} e a correspondente incerteza (com 95,4% de confiança) para vários instantes, dados em horas. A parte destacada mostra valores de $A(t)$ estatisticamente equivalentes, o que ocorre a partir de 4 h.

A parte destacada da Figura 8 indica os valores estatisticamente iguais para $A(t)$, e são dados por $(12,01 \pm 0,12)$, com confiança de 95,4%, para instantes a partir de $t = 4$ h.

5.2.2. Consumo de substrato

Os modelos de Baranyi, Gompertz e Logistic foram testados para descrever o consumo de substrato durante a fermentação, porém não se ajustaram aos dados experimentais. Os parâmetros dos demais modelos envolvidos nesse estudo foram ajustados aos dados experimentais e os resultados estão sumarizados na Tabela 7.

Os modelos de Gompertz Generalizado e Logistic Modificado tiveram um coeficiente de determinação de 0,991, enquanto que para o modelo de Weibull, obteve-se um coeficiente de determinação de 0,995. Entretanto, os parâmetros A_m , μ_{\max} e I do modelo de Gompertz Generalizado não apresentaram significância estatística. Da mesma forma, os parâmetros μ_{\max} , A_m e λ do modelo Logistic Modificado não têm significância estatística. Ainda, os parâmetros k_1 e δ_1 do modelo de Weibull também não são significativos. Por outro lado, o modelo proposto nesse artigo, (que em última análise pode ser interpretado como uma modificação do modelo de Weibull, em que δ_1 foi fixado com o valor 3,0), teve um coeficiente de determinação igual a 0,991, um qui-quadrado de 0,000133 além dos fatores de viés e de precisão próximos do valor 1. Para o modelo proposto, a probabilidade do parâmetro k_1 ser zero, mesmo tendo o valor obtido, é de apenas 0,1%. Assim, de todos os resultados obtidos na Tabela 7 o modelo proposto pode ser considerado como mais aceitável para descrever o consumo de substrato na solução filmogênica durante a fermentação com *Lactobacillus salivarius*.

Os açúcares redutores são consumidos pelo *Lactobacillus salivarius* durante o processo de fermentação. Nas primeiras horas de fermentação, foi observado um declínio mais acentuado desse parâmetro, como mostra a Figura 9, o que corresponde ao período de crescimento exponencial da concentração de células na solução filmogênica. Esse comportamento foi bem simulado pelo modelo proposto.

Tabela 7. Parâmetros e desvio padrão dos modelos para o processo consumo de substrato na solução filmogênica.

Parâmetros	Modelo Gompertz Generalizado						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	1,2170 ± 0,0030	467,2810	0,0000	0,9910	0,000133	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	1,9860 ± 565,2780	0,0040	0,9970				
μ_{\max} (h ⁻¹)	1,8600 ± 37,8700	0,0490	0,9630				
I (h)	-0,8910 ± 460,6580	-0,0020	0,9990				
Parâmetros	Modelo Logistic Modificado						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	1,2170 ± 0,0030	466,9270	0,0000	0,9910	0,000133	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	3,7340 ± 3248,140	0,0010	0,9990				
μ_{\max} (h ⁻¹)	0,5600 ± 11,0560	0,0510	0,9620				
λ (h)	-2,6550 ± 803,9960	-0,0030	0,9980				
Parâmetros	Modelo Weibull						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	1,1100 ± 0,0250	43,7350	0,0000	0,9950	0,000082	1,0000	1,010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	1,3500 ± 0,0050	291,9340	0,0000				
k ₁	0,0030 ± 0,0160	0,2010	0,8510				
δ_1	0,0540 ± 0,0400	1,3540	0,2470				
Parâmetros	Modelo proposto						
	Estimado	Teste t	Nível p	R ²	χ^2	FV	FP
A ₀ (LogUFC mL ⁻¹)	1,2170 ± 0,0020	577,1160	0,0000	0,9910	0,000133	1,0000	1,0010
A _m (LogUFC mL ⁻¹)	1,3500 ± 0,0050	261,4260	0,0000				
k ₁	0,7730 ± 0,1160	6,6350	0,0010				

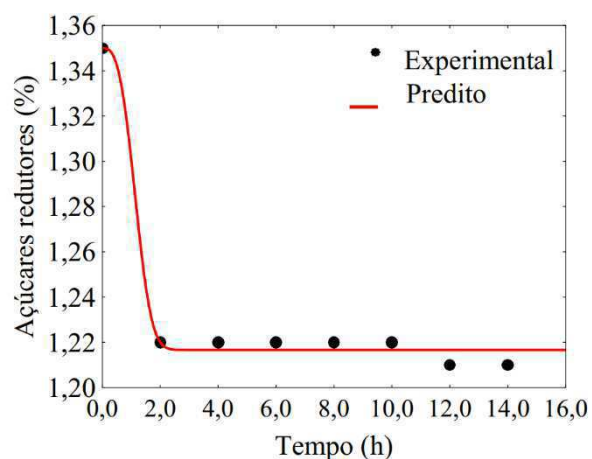


Figura 9. Curva de consumo de substrato durante a fermentação com *Lactobacillus salivarius* na solução filmogênica com ajuste do modelo proposto.

Para o consumo de substrato, a matriz de covariâncias é dada por:

$$\text{cov} = \begin{bmatrix} 4,44444 \times 10^{-6} & 1,32349 \times 10^{-23} & 1,05832 \times 10^{-4} \\ 1,32349 \times 10^{-23} & 2,66667 \times 10^{-5} & 1,62818 \times 10^{-5} \\ 1,05832 \times 10^{-4} & 1,62818 \times 10^{-5} & 1,84358 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Dessa forma, tem-se todas as informações para a completa determinação da quantidade de substrato (açúcares redutores, %) ao longo do tempo. A propósito, para $t \geq 3,0$ h, esta quantidade é dada por $RC = (1,217 \pm 0,006) \%$, com uma confiança de 95,4%, conforme pode ser observado na parte destacada da Figura 10.

t	AR(t)	$\sigma_{AR}(95,4\%)$
0.00000E+00	0.13500E+01	0.13694E-01
0.50000E+00	0.13388E+01	0.17594E-01
0.10000E+01	0.12922E+01	0.51005E-01
0.15000E+01	0.12411E+01	0.48221E-01
0.20000E+01	0.12200E+01	0.13694E-01
0.25000E+01	0.12168E+01	0.52476E-02
0.30000E+01	0.12167E+01	0.55797E-02
0.35000E+01	0.12167E+01	0.55903E-02
0.40000E+01	0.12167E+01	0.55904E-02
0.45000E+01	0.12167E+01	0.55904E-02

Figura 10. Valores de AR(t) em percentual e a correspondente incerteza (com 95,4% de confiança) para vários instantes, dados em horas. A parte destacada mostra valores de A(t) estatisticamente equivalentes, o que ocorre a partir de 4 h.

5.3. Viabilidade celular durante a secagem

Na Tabela 8, estão resumidas as concentrações de células viáveis do *Lactobacillus salivarius* nas fatias de mamão antes do processo de secagem convectiva e após a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, e respectivas reduções.

Tabela 8. Concentração de células viáveis do *Lactobacillus salivarius* nas fatias de mamão *in natura* e secas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tratamento	Concentração de células (LogUFC g ⁻¹)	Redução (LogUFC g ⁻¹)
<i>in natura</i>	10,07 ± 0,01 ^a	-
Revestimento probiótico 50 °C	8,97 ± 0,01 ^b	1,10 ^b
Revestimento probiótico 60 °C	8,86 ± 0,03 ^c	1,22 ^{ab}
Revestimento probiótico 70 °C	8,77 ± 0,04 ^c	1,30 ^a

Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes (p <0,05).

Analisando a Tabela 8, verificou-se que houve uma redução significativa no número de células viáveis após a secagem das fatias de mamão. A redução da concentração viável de células foi gradual com o aumento da temperatura de secagem. Tal comportamento era esperado, uma vez que temperaturas mais elevadas causam maior estresse a células sensíveis.

Para descrever a viabilidade do *Lactobacillus salivarius* nas fatias de mamão durante o processo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, foi usado o LAB Fit Curve Fitting Software para descobrir uma função de ajuste, usando o recurso “Finder”, que possibilitou ajustar todas as funções de sua biblioteca a um conjunto de dados experimentais em poucos segundos, e as melhores funções são escolhidas através dos menores qui-quadrados obtidos. A função 128 ($Y = A \times B^x + C$), com 3 parâmetros foi a mais adequada, apresentando os menores qui-quadrados dentre as funções testadas pelo software.

As Equações 49, 50 e 51 corresponde a função 128 com os parâmetros estimados mediante o ajuste aos dados da viabilidade das células com o tempo secagem nas fatias de mamão com revestimento probiótico, no processo de secagem a 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

$$T_{50^{\circ}\text{C}} = 1,21246 \times 0,98879^t + 8,92438 \quad (49)$$

$$R^2 = 0,9748$$

$$T_{60^{\circ}\text{C}} = 1,32333 \times 0,98529^t + 8,84869 \quad (50)$$

$$R^2 = 0,9657$$

$$T_{70^{\circ}\text{C}} = 1,41252 \times 0,98499^t + 8,73368 \quad (51)$$

$$R^2 = 0,9639$$

Na Figura 11, são apresentados o comportamento da cultura probiótica durante o processo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, com o ajuste das respectivas equações.

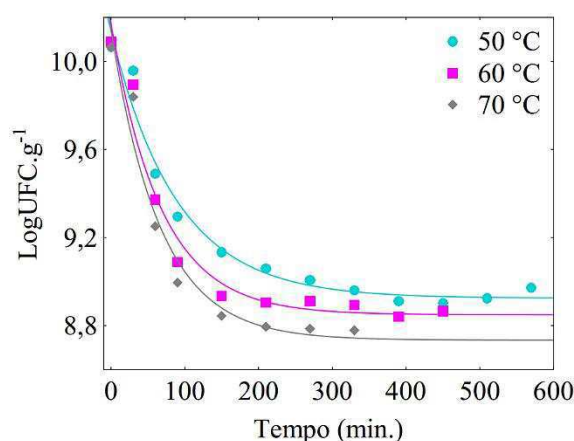


Figura 11. Concentração de células viáveis do *Lactobacillus salivarius* durante o processo de secagem das fatias de mamão nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. A linha contínua representa a função de ajuste.

Analisando a Figura 11, verifica-se uma redução da concentração de células mais acentuada nos primeiros minutos de secagem, sendo mais acentuada quando observamos o aumento da temperatura. Uma redução da viabilidade das células do *Lactobacillus salivarius* era esperada, uma vez que a exposição da cultura probiótica à temperaturas altas por um longo período de tempo cause estresse nas células. No entanto, a partir de 200 min de secagem, foi observado uma redução não significativa na concentração das células viáveis em todas as temperaturas de secagem.

Rodrigues et al. (2018) ao estudar a incorporação de *Lactobacillus casei* por imersão em cubos de maçã, observaram que tanto no processo de secagem convencional

como com a aplicação do ultrassom, nas temperaturas de 10, 40 e 60 °C, ocorreu uma redução linear da viabilidade das células, sendo observado redução de até 4 LogUFC g⁻¹, nas temperaturas de 40 e 60 °C, com tempos de secagem inferior a 150 min.

O método de incorporação de probióticos para a produção de lanches funcionais podem influenciar na conservação de probióticos após um período de estresse, como o de secagem em temperaturas elevadas e por um longo período de tempo. Isso tem sido observado ao analisar estudos anteriores, que estudaram o método de incorporação de probióticos por impregnação a vácuo em bagas de murta (ZURA-BRAVO et al., 2019), nos quais foi observado reduções entre 0,5 e 1,5 Log quando submetidas à secagem por convecção e 1,5 a 1,9 Log quando submetidas ao processo de secagem a vácuo.

Nesse estudo, foi observado reduções de 1,3 LogUFC g⁻¹, na temperatura de 70 °C. Os resultados obtidos para a conservação da viabilidade do *Lactobacillus salivarius* nas fatias de mamão durante o processo de secagem convectiva são considerados positivos, e a preservação das células pode estar relacionado ao método de incorporação, usando o revestimento comestível como veículo. Além disso, o potencial encapsulante da solução filmogênica a base de gelatina e inulina, é capaz de formar uma barreira que minimiza os impactos das condições externas de secagem, nas células do micro-organismo.

Esse resultado potencializa o uso de revestimento comestível para a incorporação de probióticos em lanches saudáveis. Embora a redução do número de células viáveis tenha ocorrido, foi mínima, comparado a estudos anteriores. Além disso, nos últimos anos, novos conceitos relacionados a probióticos, como pós-bióticos e paraprobióticos, têm sido usados para descrever micro-organismos não viáveis ou extratos livres de bactérias que podem fornecer benefícios ao hospedeiro, oferecendo bioatividades adicionais aos probióticos (CUEVAS-GONZÁLEZ; LICEAGA; AGUILAR-TOALÁ, 2020).

5.4. Modelagem matemática: cinética de secagem

O estudo cinético das condições de fermentação para a elaboração de uma solução filmogênica probiótica permitiu definir as condições ideais para maximizar a produção de células probióticas. Essas condições envolvem uma concentração de gelatina de 1,0% e 4,0% de inulina, com temperatura de fermentação de 45 °C. Após 4 h de fermentação, observou-se que a solução apresentava a concentração máxima de células probióticas, ideal para a aplicação nas fatias de mamão. Como essas fatias apresentam um alto teor de

água (7,75 b.s.), o emprego de técnicas de conservação complementar como a secagem, permitiu descartar o acondicionamento refrigerado necessário para oferta de produtos como fatias de mamão minimamente processadas.

O processo de secagem envolveu o ajuste das condições de processo para otimizar a produção, possibilitando o conhecimento de condições ótimas para o desenvolvimento de novos produtos de alta qualidade. Para isso, o estudo cinético através do ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais é uma ferramenta indispensável que permite estabelecer e prever o comportamento do produto durante o processo em determinadas condições.

No estudo cinético da secagem das fatias de mamão controle e com o revestimento probiótico nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, foram avaliados os modelos de Henderson e Pabis, Peleg, Page, Silva et alli. e Wang e Singh. Os parâmetros 'a' e 'b' desses modelos matemáticos e os indicadores estatísticos: desvio padrão (σ), coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2), estão resumidos na Tabela 9.

Analisando os dados presentes na Tabela 9, nota-se que o modelo de Henderson e Pabis apresentou um bom ajuste em todos os experimentos realizados, com coeficientes de determinação (R^2) superior a 0,9982 e qui-quadrado (χ^2) inferior a 0,0082. Para esse modelo, utilizou-se no ajuste os valores iniciais de 1,0 para o parâmetro 'a' e $1,0 \times 10^{-5}$ para o parâmetro 'b'. Verificou-se que quando analisado a cinética de secagem das fatias de mamão em temperaturas amenas (50 e 60 °C), o ajuste do modelo aos dados experimentais, indiferente ao tratamento, foi superior, com R^2 superior a 0,9991 e χ^2 inferior a 0,0052.

O modelo de Peleg apresentou um bom ajuste aos experimentos realizados, porém, inferior ao observado no estudo do modelo de Henderson e Pabis. O ajuste do modelo de Peleg foi realizado utilizando o valor inicial de 1,0 para os parâmetros 'a' e 'b' do modelo.

Tabela 9. Parâmetros estimados e desvio padrão dos modelos matemáticos ajustados a experimentos de secagem das fatias de mamão.

Modelo de Henderson e Pabis								
Temperatura (°C)	Tratamento	Parâmetros	Estimado	Teste t	Nível p	σ	R ²	χ^2
50	Controle	a	1,0044 ± 0,0059	169,5779	0,0000	0,0128	0,9994	0,0036
		b	0,0082 ± 0,0001	68,9579	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	1,0069 ± 0,0070	143,5594	0,0000	0,0150	0,9992	0,0052
		b	0,0085 ± 0,0001	59,0975	0,0000			
60	Controle	a	1,0064 ± 0,0078	128,8212	0,0000	0,0143	0,9992	0,0043
		b	0,0137 ± 0,0002	58,9847	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	1,0125 ± 0,0089	113,9181	0,000	0,0156	0,9991	0,0051
		b	0,0158 ± 0,0003	54,0482	0,0000			
70	Controle	a	1,0112 ± 0,0126	80,0512	0,0000	0,0213	0,9982	0,0082
		b	0,0180 ± 0,0005	39,2786	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	1,0076 ± 0,0078	130,5614	0,0000	0,0121	0,9994	0,0028
		b	0,0223 ± 0,0003	66,3972	0,0000			

(continua)

 σ é o desvio padrão da função.

Tabela 9. Parâmetros estimados e desvio padrão dos modelos matemáticos ajustados a experimentos de secagem das fatias de mamão.

(continuação)

Modelo de Peleg								
Temperatura (°C)	Tratamento	Parâmetros	Estimado	Teste t	Nível p	σ	R ²	χ^2
50	Controle	a	104,7359 ± 3,438	30,4653	0,0000	0,0253	0,9976	0,0141
		b	0,7687 ± 0,0143	53,9468	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	98,9796 ± 4,1478	23,8635	0,0000	0,0333	0,9960	0,0255
		b	0,7870 ± 0,0167	47,1356	0,0000			
60	Controle	a	57,7878 ± 3,0530	18,9285	0,0000	0,0413	0,9935	0,0357
		b	0,8247 ± 0,0189	43,5415	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	49,4941 ± 2,9828	16,5935	0,0000	0,0473	0,9913	0,0469
		b	0,8376 ± 0,0203	41,2098	0,0000			
70	Controle	a	45,6862 ± 2,6356	17,3341	0,0000	0,0426	0,9928	0,0326
		b	0,7953 ± 0,0225	35,3961	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	33,5238 ± 2,0922	16,0234	0,0000	0,0458	0,9912	0,0399
		b	0,8507 ± 0,0201	42,3947	0,0000			

 σ é o desvio padrão da função.

Tabela 9. Parâmetros estimados e desvio padrão dos modelos matemáticos ajustados a experimentos de secagem das fatias de mamão.

(continuação)

Modelo de Page								
Temperatura (°C)	Tratamento	Parâmetros	Estimado	Teste t	Nível p	σ	R ²	χ^2
50	Controle	a	0,0071 ± 0,0006	12,4681	0,0000	0,0118	0,9995	0,0031
		b	1,0302 ± 0,0171	60,2901	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	0,0068 ± 0,0006	10,9803	0,0000	0,0129	0,9994	0,0039
		b	1,0477 ± 0,0195	53,6228	0,0000			
60	Controle	a	0,0112 ± 0,0010	11,6463	0,0000	0,0125	0,9994	0,0033
		b	1,0467 ± 0,0203	51,5217	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	0,0115 ± 0,0010	11,8830	0,0000	0,0118	0,9995	0,0029
		b	1,0738 ± 0,0205	52,4127	0,0000			
70	Controle	a	0,0130 ± 0,0016	8,0326	0,0000	0,0176	0,9988	0,0056
		b	1,0792 ± 0,0311	34,7248	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	0,0183 ± 0,0012	15,2585	0,0000	0,0097	0,9996	0,0018
		b	1,0502 ± 0,0172	61,1415	0,0000			

 σ é o desvio padrão da função.

Tabela 9. Parâmetros estimados e desvio padrão dos modelos matemáticos ajustados a experimentos de secagem das fatias de mamão.

(continuação)

Modelo de Silva et alli								
Temperatura (°C)	Tratamento	Parâmetros	Estimado	Teste t	Nível p	σ	R ²	χ^2
50	Controle	a	0,0084 ± 0,0002	36,5039	0,0000	0,0125	0,9994	0,0034
		b	-0,0027 ± 0,0020	-1,3570	0,1886			
	Revestimento probiótico	a	0,0089 ± 0,0003	32,2926	0,0000	0,0143	0,9993	0,0047
		b	-0,0044 ± 0,0024	-1,8813	0,0727			
60	Controle	a	0,0143 ± 0,0005	30,7126	0,0000	0,0137	0,9993	0,0039
		b	-0,0055 ± 0,0033	-1,6810	0,1076			
	Revestimento probiótico	a	0,0169 ± 0,0006	30,1643	0,0000	0,0140	0,9993	0,0041
		b	-0,0103 ± 0,0037	-2,7768	0,0113			
70	Controle	a	0,0194 ± 0,0010	20,9404	0,0000	0,0199	0,9984	0,0071
		b	-0,0111 ± 0,0058	-1,9081	0,0725			
	Revestimento probiótico	a	0,0235 ± 0,0007	34,4517	0,0000	0,0111	0,9995	0,0023
		b	-0,0087 ± 0,0040	-2,1908	0,0411			

 σ é o desvio padrão da função.

Tabela 9. Parâmetros estimados e desvio padrão dos modelos matemáticos ajustados a experimentos de secagem das fatias de mamão.

(conclusão)

Modelo de Wang e Singh								
Temperatura (°C)	Tratamento	Parâmetros	Estimado	Teste t	Nível p	σ	R ²	χ^2
50	Controle	a	-0,0053 ± 0,0002	-27,0031	0,0000	0,0707	0,9811	0,1098
		b	0,00001 ± 0,0000	15,4388	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	-0,0051 ± 0,0002	-24,2687	0,0000	0,0848	0,9736	0,1654
		b	0,00001 ± 0,0000	14,4256	0,0000			
60	Controle	a	-0,0071 ± 0,0004	-17,3985	0,0000	0,1309	0,9320	0,3596
		b	0,00001 ± 0,0000	10,8715	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	-0,0074 ± 0,0005	-15,4165	0,0000	0,1547	0,9029	0,5025
		b	0,00001 ± 0,0000	9,8365	0,0000			
70	Controle	a	-0,0101 ± 0,0005	-18,9613	0,0000	0,1121	0,9491	0,2263
		b	0,00002 ± 0,0000	11,2856	0,0000			
	Revestimento probiótico	a	-0,0097 ± 0,0007	-13,3363	0,0000	0,1810	0,8524	0,6226
		b	0,00002 ± 0,0000	8,4711	0,0000			

 σ é o desvio padrão da função.

O modelo de Page amplamente usado para descrever o processo de secagem de diversos produtos agrícolas, apresentou valores de R^2 superiores a 0,9988 e χ^2 inferiores a 0,0056, quando analisado o ajuste do modelo aos dados experimentais usando os valores iniciais de $1,0 \times 10^{-5}$ para o parâmetro 'a' e 0,7 para o parâmetro 'b' do modelo. Diante disso, o modelo de Page descreve bem o processo de secagem das fatias de mamão em todas as condições testadas.

Os parâmetros e indicadores estatísticos obtidos do ajuste do modelo de Silva et alli. mostram R^2 superiores a 0,9984 e χ^2 inferiores a 0,0071. Porém, o parâmetro 'b' estimado em todos os experimentos de secagem pelo modelo, apresentaram uma probabilidade superior a 4% de assumir o valor zero, sendo pouco indicado para descrever com precisão o processo de secagem das fatias de mamão.

Já o modelo de Wang e Singh resultou nos ajustes com menores valores de R^2 e maiores valores de χ^2 , quando comparado aos dados obtidos dos ajustes dos demais modelos estudados. Diante disso, constatou-se que o modelo de Page é o mais adequado, dentre os modelos matemáticos estudados nesse trabalho para descrever o processo de secagem das fatias de mamão controle e com o revestimento probiótico, secas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C (Figura 12).

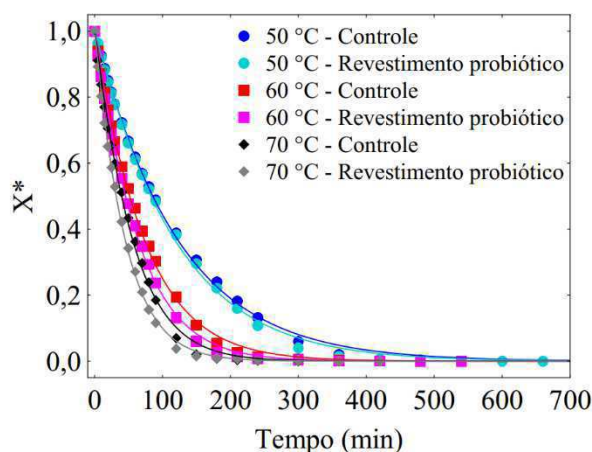


Figura 12. Cinética de secagem das fatias de mamão descritas pelo ajuste do modelo de Page nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Ao analisar os valores estimados para os parâmetros 'a' e 'b' pelo modelo de Page (Tabela 9) notou-se que os mesmos apresentam uma relação com a temperatura de secagem, observando um aumento com o incremento da temperatura do ar de secagem.

Pereira et al. (2020) no estudo da secagem contínua de arroz bruto nas temperaturas de 50 e 70 °C, observaram que o modelo de Page também foi o mais adequado para descrever a cinética de secagem contínua do arroz. O aumento dos valores do parâmetro 'a' do modelo de Page com o aumento da temperatura de secagem, foi relatado por Santos et al. (2020) no estudo do mesmo modelo na secagem do arroz vermelho nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Na secagem de fruta como o pêssego, o mesmo comportamento foi relatado por Santos et al. (2019), para o parâmetro 'a' do modelo, no processo de secagem nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C. Esse aumento observado deve-se ao aumento da taxa de secagem com o uso de temperaturas mais elevadas.

Na Tabela 10, estão resumidos o tempo de secagem para as fatias de mamão atingir o equilíbrio termodinâmico e seus respectivos teores de água final. Nota-se a influência significativa ($p > 0,05$) do tratamento (controle, revestimento probiótico) e da temperatura nas respostas: tempo e teor de água.

Tabela 10. Tempo de secagem e teor de água das fatias de mamão.

Experimento	Tempo (min)	Teor de água (b.s.)
I	600 a	0,1482 ab
II	600 a	0,1581 a
III	540 b	0,1436 ab
IV	540 b	0,1450 ab
V	360 d	0,1043 c
VI	420 c	0,1301 b

Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ($p < 0,05$).

I – Controle 50 °C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

O uso de temperaturas mais elevadas do ar durante o processo de secagem das fatias de mamão reduziu significativamente o tempo do processo, no entanto, também foi observado que a aplicação do revestimento probiótico nas fatias de mamão resultou no aumento de tempo de secagem na temperatura de 70 °C, comparado as fatias de mamão controle secas a 70 °C. O comportamento referente ao incremento da temperatura, se deve ao fato, de que as maiores taxas de remoção de água do produto ocorrem em temperaturas mais elevadas, o que reduz o tempo de secagem (MELO et al., 2015).

Analisando os dados do teor de água final das fatias de mamão resumidos na Tabela 10, observa-se valores entre 0,1581 e 0,1043 (b.s.) nos experimentos de secagem

a 50 °C com a aplicação do revestimento probiótico e a 70 °C das fatias de mamão controle, respectivamente. Santos et al. (2019b) relataram teores de água entre 7,90 (% b.u.) a 80 °C e 13,69% b.u. a 50 °C, quanto estudou o efeito da temperatura na secagem de pimentão amarelo. Islam et al. (2019) obtiveram teores de água entre 9,43 e 11,90% para o mamão controle seco nas temperaturas de 70 e 50 °C. Os mesmos autores, mostraram que a aplicação do filme comestível a base de amido de batata em diferentes concentrações, resultou na redução da eficiência do processo de secagem na remoção da água presente nas amostras, relatando teores de água entre 13,08 e 13,78% nas concentrações de 1% e 3% de amido de batata presente no filme comestível, respectivamente. Ao comparar esses relatos encontrados na literatura com os resultados obtidos nesse estudo, observa-se um comportamento semelhante, tanto para a temperatura de secagem quanto para a aplicação do revestimento, influenciando significativamente o teor de água final das fatias de mamão.

5.5. Difusividade efetiva: condição de contorno de primeiro e terceiro tipo

A difusividade efetiva determinada pelos modelos de difusão com condição de contorno de primeiro e terceiro tipo e respectivos R^2 e χ^2 , além do coeficiente convectivo de transferência de massa e o número de Biot obtidos pelo ajuste do modelo de difusão com condição de contorno de terceiro tipo, estão resumidos na Tabela 11.

Observando os dados apresentados na Tabela 11, nota-se que a condição de contorno de terceiro tipo descreveu bem o processo de secagem em todas as condições do processo de secagem, quando analisado os coeficientes de determinação e qui-quadrados, com R^2 superior a 0,99 e baixos χ^2 . Enquanto, o modelo de difusão de primeiro tipo apresenta valores de R^2 entre 0,98 e 0,99 e valores superior de χ^2 , comparado aos valores obtidos utilizando a condição de contorno de terceiro tipo. Diante disto, assumiu-se a condição de terceiro tipo como a mais adequada para descrever o processo de difusão na secagem das fatias de mamão nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tabela 11. Difusividade efetiva com condição de primeiro e terceiro tipo e indicadores estatísticos (R^2 e χ^2).

Experimentos	Condição do primeiro tipo			Condição do Terceiro tipo				
	D ($m^2 s^{-1}$)	R^2	χ^2	D ($m^2 s^{-1}$)	B_i	h ($m s^{-1}$)	R^2	χ^2
I	$(2,50 \pm 0,07) \times 10^{-4}$ c	0,9914	0,0964	$(1,63 \pm 1,62) \times 10^{-7}$ b	$(9,88 \pm 5,43) \times 10^{-3}$ a	$(4,14 \pm 0,41) \times 10^{-7}$ c	0,9989	0,0046
II	$(2,61 \pm 0,17) \times 10^{-4}$ c	0,9904	0,1026	$(1,58 \pm 1,55) \times 10^{-7}$ b	$(3,09 \pm 1,57) \times 10^{-3}$ a	$(3,82 \pm 0,28) \times 10^{-7}$ c	0,9986	0,0058
III	$(4,27 \pm 0,21) \times 10^{-4}$ b	0,9887	0,0750	$(7,22 \pm 3,79) \times 10^{-7}$ b	$(3,35 \pm 3,33) \times 10^{-3}$ a	$(6,18 \pm 0,61) \times 10^{-7}$ b	0,9986	0,0047
IV	$(4,95 \pm 0,35) \times 10^{-4}$ b	0,9867	0,0791	$(7,57 \pm 3,78) \times 10^{-7}$ b	$(1,35 \pm 1,33) \times 10^{-3}$ a	$(6,97 \pm 0,44) \times 10^{-7}$ b	0,9982	0,0057
V	$(5,74 \pm 0,39) \times 10^{-4}$ a	0,9860	0,0761	$(1,93 \pm 0,09) \times 10^{-6}$ a	$(0,02 \pm 0,00) \times 10^{-3}$ a	$(7,73 \pm 0,03) \times 10^{-7}$ a	0,9968	0,0085
VI	$(7,40 \pm 1,29) \times 10^{-4}$ a	0,9853	0,0640	$(2,13 \pm 2,93) \times 10^{-6}$ a	$(0,02 \pm 0,00) \times 10^{-3}$ a	$(1,00 \pm 0,18) \times 10^{-6}$ a	0,9975	0,0062

Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ($p < 0,05$).

I – Controle 50 °C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

A temperatura influenciou significativamente os parâmetros de difusão estimados (Tabela 11). Observou-se o aumento dos valores estimados de difusividade efetiva quando foi analisado a temperatura de 70 °C. O aumento da difusividade efetiva com o incremento da temperatura é um comportamento esperado em materiais biológicos. O mesmo comportamento foi observado por Doymaz (2017) ao estudar a difusividade efetiva na secagem de rodelas de cenoura em diferentes temperaturas.

Ao analisar os valores estimados para o número de Biot (B_i), não foi observado uma relação significativa entre os tratamentos e as temperaturas de secagem. O B_i é um número adimensional que correlaciona a taxa de condução interna com a taxa de convecção externa, sendo capaz de indicar a resistência interna do produto ao processo de transferência de calor e massa (SANTOS et al., 2020a). Na Tabela 11, nota-se que os valores obtidos para o número de B_i são baixos na ordem de 10^3 , mostrando que apesar dos bons coeficientes de determinação e baixos qui-quadrado, o modelo de difusão não é muito adequado para descrever o processo de secagem das fatias de mamão. Isso pode ser atribuído ao alto teor de água inicial do produto que foi de 7,75 (b.s.). Semelhante ao observado nesse trabalho, relatou Moreira et al. (2018) no estudo da produção de lanches de fatias de kiwi; Santos et al. (2020a) no estudo dos efeitos do pré-tratamento de ultrassom na cinética e nas propriedades termodinâmicas do processo de secagem das rodelas de goiaba; e Almeida et al. (2020) ao estudarem a influência da espessura na cinética de secagem de fatias de beterraba.

É possível verificar ainda na Tabela 11, que a aplicação do revestimento comestível probiótico nas fatias de mamão não influenciou no coeficiente convectivo de transferência de massa (h). Enquanto a temperatura resultou no aumento significativo com o aumento da temperatura. Segundo Santos et al. (2019a), valores elevados do coeficiente convectivo de transferência de massa tendem a apresentar um menor tempo para que as amostras atinjam o teor de água de equilíbrio, resultado verificado na Tabela 10.

5.6. Energia de ativação e propriedades termodinâmicas

Foi necessário maior energia de ativação para a secagem das fatias de mamão com o revestimento probiótico ($104228,7 \text{ J mol}^{-1}$) comparado as fatias de mamão controle ($99471,75 \text{ J mol}^{-1}$). O aumento da energia de ativação com a aplicação do revestimento probiótico, sugerem que as fatias tratadas necessitam de mais energia para iniciar a difusão da umidade. A energia de ativação é diferente para cada produto agrícola, sendo

frequentemente relatado na literatura valores na faixa entre 12,7 e 110 KJ mol⁻¹ (KAVEH; AMIRI CHAYJAN; NIKBAKHT, 2017). Variações da energia de ativação pode estar relacionado a estrutura do produto estudado, assim como, sua composição química e especificações do secador.

Na Tabela 12, foram resumidos os resultados obtidos para as propriedades termodinâmicas nas diferentes condições do processo de secagem das fatias de mamão.

Tabela 12. Propriedades termodinâmicas das fatias de mamão desidratadas.

Experimentos	ΔH (J mol ⁻¹)	$\Delta S \times 10^{-4}$ (J mol ⁻¹)	ΔG (J mol ⁻¹)
I	96785,47	-65,06	117807,81
II	101542,03	-50,37	117818,13
III	96701,94	-65,31	118459,64
IV	101458,89	-50,62	118323,08
V	96618,80	-65,55	119113,96
VI	101375,75	-50,87	118830,52

I – Controle 50 °C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

A análise termodinâmica fornece uma compreensão abrangente da cinética térmica durante o processo de secagem (SARPONG et al., 2019). Ao analisar os resultados presentes na Tabela 12, é possível verificar uma relação da aplicação do revestimento probiótico com os valores obtidos para as propriedades de entalpia e entropia. A aplicação do revestimento comestível probiótico nas fatias de mamão resultou no aumento da entalpia e entropia em todas as temperaturas analisadas.

O aumento da temperatura resultou na redução dos valores obtidos para a entalpia das fatias de mamão, uma vez que a entalpia está relacionada à energia necessária para remover a água aderida ao produto durante o processo de secagem (OLIVEIRA et al., 2010), observa-se que as fatias revestidas demandaram mais energia no processo de secagem, diferente do efeito da temperatura, em que o incremento dessa condição reduziu a necessidade de energia para remover a água presente no produto. O mesmo comportamento foi relatado em estudo do aumento da temperatura nas propriedades termodinâmicas de maçã seca a vácuo (NADI; TZEMPELIKOS, 2018), na secagem de fatias de goiaba com pré-tratamento usando ultrassom (SANTOS et al., 2020a), no estudo

do ultrassom multifrequencial e secagem por infravermelho na cinética de secagem de batata doce (RASHID et al., 2019) e nas propriedades termodinâmicas da secagem da polpa de ‘bacaba’ (MORAIS et al., 2019).

Os valores de entropia (ΔS) que medem a mudança desordenada de moléculas em um sistema foram negativos (Tabela 12). De acordo com Rashid et al. (2019), valores negativos de entropia indica que o estado de transição tem um grau de liberdade estrutural menor do que os reagentes. Além disso, as temperaturas mais elevadas podem aumentar o valor absoluto de entropia, o que torna o equilíbrio termodinâmico do material diferente do sistema original. O aumento do valor absoluto de entropia foi observado quando aumentou a temperatura de secagem das fatias de mamão. Já a aplicação do revestimento comestível probiótico resultou em valores em absoluto menores, quando comparado as fatias que não receberam o tratamento antes da secagem. Tal comportamento pode estar relacionado à organização das moléculas devido à interação do sistema água e produto, com o revestimento comestível probiótico formulado com gelatina e inulina.

A energia livre de Gibbs (ΔG) estar relacionada à atividade do sistema no processo de adsorção ou dessorção e fornece uma melhor visão sobre quais forças termodinâmicas de acionamento influenciam as reações (KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2007; NADI; TZEMPELIKOS, 2018). Os valores de ΔG obtidos nas diferentes condições de secagem das fatias de mamão, resumidos na Tabela 12, indicam a ocorrência de reações não espontâneas. Nota-se ao verificar a Tabela 12, que os valores obtidos tendem a aumentar com o aumento da temperatura. Esse comportamento é frequentemente relatado para produtos como: maçã (NADI; TZEMPELIKOS, 2018), goiaba (SANTOS et al., 2020a) e batata doce (RASHID et al., 2019) entre outros produtos agrícolas.

5.7. Encolhimento

Durante o processo de secagem, o aumento da temperatura da amostra oferece mais energia para as moléculas de água, começando pela camada superficial que evapora rapidamente. Isso pode levar ao aumento substancial do estresse estrutural da superfície do material e ao rápido encolhimento das fatias de mamão (DAI et al., 2019).

Para descrever o comportamento da taxa de encolhimento das fatias de mamão durante o processo de secagem em diferentes condições, foi utilizado o recurso “Finder” do LAB Fit Curve Fitting Software para descobrir uma função de ajuste adequada. A

função 128 ($Y = A \times B^x + C$), foi a mais adequada, apresentando os menores quadrados, dentre as funções testadas pelo software, para descrever o encolhimento das fatias de mamão controle e probiótico nas temperaturas: 50 (Equações 52 e 53), 60 (Equações 54 e 55) e 70 °C (Equações 56 e 57).

$$\begin{aligned} \text{Controle} &= 0,97014 \times 0,99299^t + 0,06239 \\ R^2 &= 0,9916 \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \text{Revestimento probiótico} &= 0,95152 \times 0,99396^t + 0,08715 \\ R^2 &= 0,9915 \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \text{Controle} &= 0,86668 \times 0,98612^t + 0,11231 \\ R^2 &= 0,9945 \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \text{Revestimento probiótico} &= 0,96220 \times 0,99019^t + 0,10100 \\ R^2 &= 0,9797 \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \text{Controle} &= 0,92038 \times 0,98737^t + 0,10687 \\ R^2 &= 0,9892 \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \text{Revestimento probiótico} &= 0,84145 \times 0,99043^t + 0,18674 \\ R^2 &= 0,9904 \end{aligned} \quad (57)$$

Na Figura 13, observa-se a taxa de encolhimento do volume das fatias de mamão controle e com o revestimento probiótico, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, durante o tempo de secagem.

O encolhimento do volume das fatias de mamão acompanha a taxa de secagem, verificando-se uma retração maior nas primeiras horas de secagem, sendo ainda mais acentuada nas temperaturas de 70 e 60 °C, e após um período de elevada taxa de secagem, a retração do volume tende a zero. Fenômeno semelhante ao observado nesse relato foi descrito por Farias et al. (2020) no estudo da transferência de calor e massa e variações de volume em fatias de banana durante a secagem convectiva.

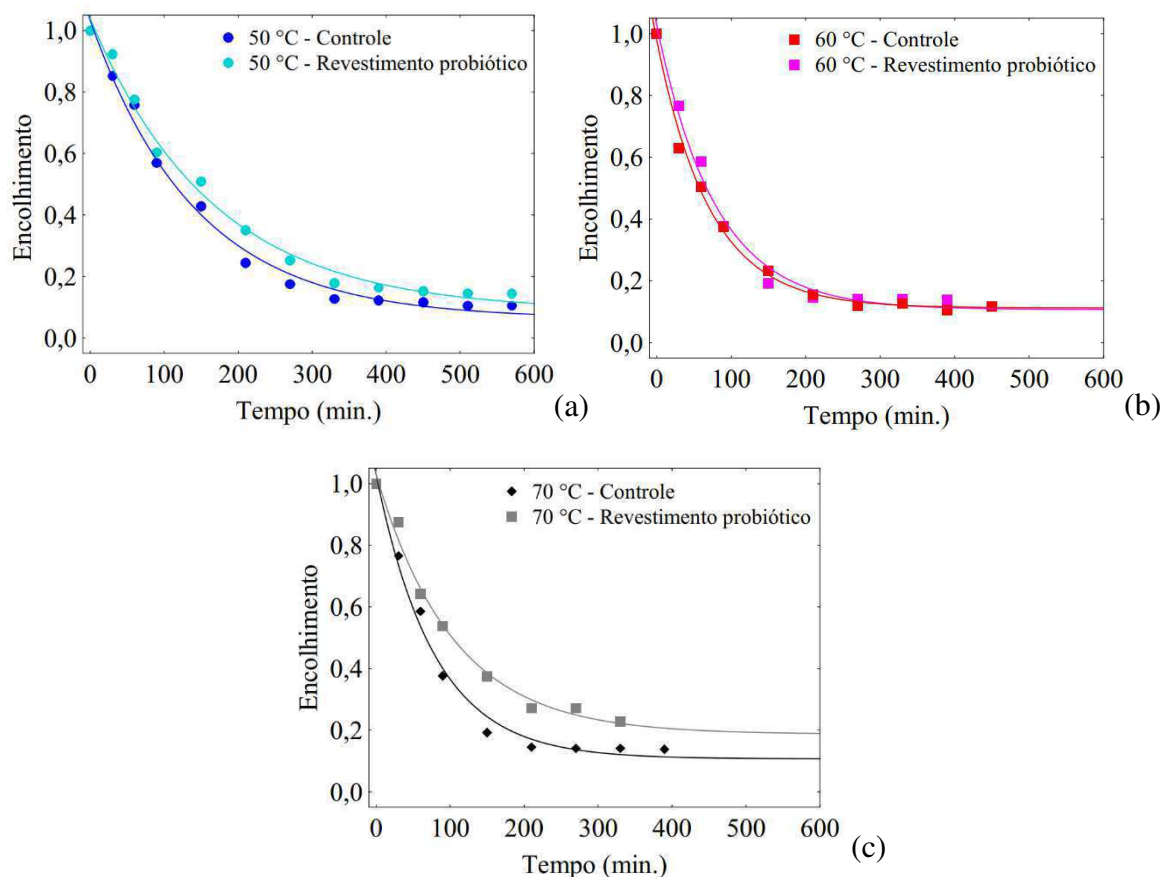


Figura 13. Encolhimento das fatias de mamão durante secagem nas temperaturas: (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C. A linha contínua representa a função de ajuste.

Fazendo uma comparação entre as fatias de mamão com revestimento probiótico e as fatias de mamão controle, observou-se que o revestimento probiótico das fatias de mamão resultou na redução da taxa de encolhimento do volume. A aplicação de revestimentos comestíveis como pré-tratamento a secagem, reduziu a porcentagem de encolhimento de mamão (ISLAM et al., 2019), da fruta wolfberry (YU et al., 2020) e fatias de banana (DEHSHEIKH; DINANI, 2019). Isso pode ser resultado da formação de uma fina película na superfície das fatias, levando a estabilização mecânica da superfície que limita o grau de encolhimento.

5.8. Cor

O aspecto visual das fatias de mamão foi acompanhado durante a secagem em diferentes condições (50, 60 e 70 °C), proporcionando a visualização das alterações causadas na cor e estrutura das fatias. Sabido a importância do aspecto visual do produto para decisão e intenção de compra, foi feito um estudo qualitativo das alterações provocadas pelo calor e o efeito do revestimento probiótico nas características de cor e

estruturais das fatias de mamão. Na Figura 14, observa-se a evolução do aspecto visual das fatias de mamão controle e com o revestimento probiótico durante o tempo de secagem nas diferentes temperaturas.

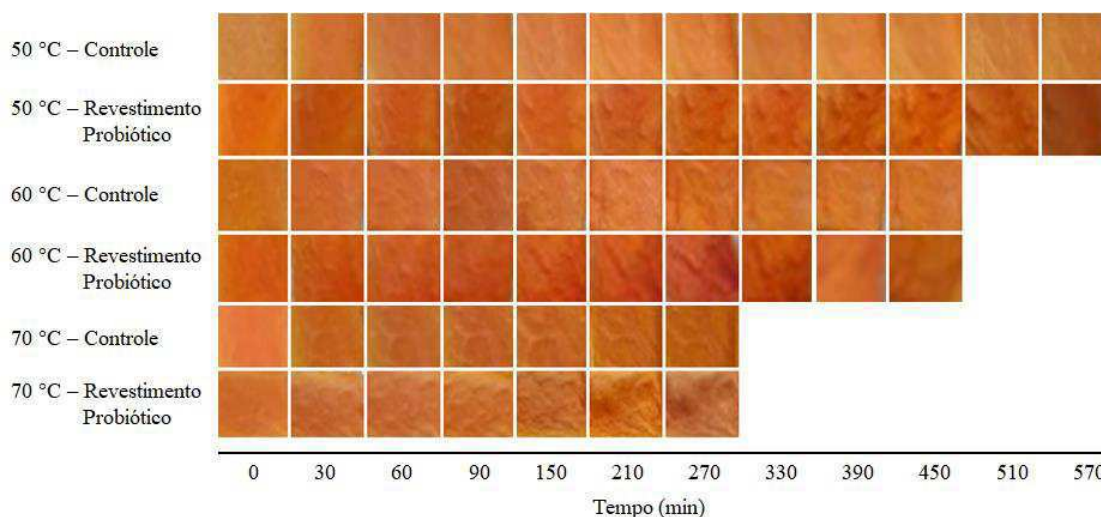


Figura 14. Aspecto visual da cor das fatias de mamão com o tempo de secagem em diferentes temperaturas.

As imagens correspondentes ao tempo 0 min foram registradas imediatamente após a aplicação do revestimento probiótico. Analisando a Figura 14, nota-se que as amostras com o revestimento probiótico apresentam uma coloração viva e mais nítida comparado as amostras controle. Alterações na cor das fatias de mamão pode ser resultado de reações enzimáticas e não enzimáticas (WANG et al., 2018), o que, nas fatias de mamão com revestimento probiótico foi minimizado, podendo ser atribuído a imediata aplicação da solução filmogênica nas fatias de mamão após o corte, reduzindo o contato do fruto com oxigênio, assim como, a variação da cor das fatias iniciais pode ser justificada pela variação ocorrida entre frutos.

Após os primeiros minutos de secagem, é constatado um escurecimento gradual das fatias de mamão em ambos os tratamentos. No entanto, o aumento da temperatura (70 °C) de secagem resultou na redução do tempo de contato das amostras com o ar quente, resultando em amostras com colocação final relativamente mais clara comparada a coloração final obtida nas amostras secas nas temperaturas de 50 e 60 °C.

Ainda analisando as imagens apresentadas na Figura 14, nota-se alterações na estrutura das fatias. Nas fatias tratadas com o revestimento probiótico, observou-se uma tendência a formação de bolhas de ar durante o processo de transferência de massa. A

formação de bolhas na superfície das fatias com o revestimento probiótico foi constatado decorrido 150 min do tempo de secagem, correspondendo ao período de tempo em que a taxa de secagem foi alta. O aumento da energia das moléculas de água corresponde ao aumento da transferência de massa ocorrida nos períodos iniciais de secagem, que nesse estudo, pode ter encontrado uma barreira na camada de revestimento probiótico, formando bolhas de ar na superfície das fatias.

Islam et al. (2019) relataram que o aumento da concentração do revestimento comestível com amido de batata resultou na redução da taxa de secagem de mamão, mostrando que dependendo do material utilizado no revestimento, pode interferir significativamente no processo de secagem, formando uma barreira a transferência de massa, resultando no aumento do tempo de secagem, fato observado neste trabalho, cuja barreira é formada pelo revestimento pode causar alteração do aspecto visual das fatias com a formação de bolhas, resultando em um produto final enrugado, como foi verificado nas imagens apresentadas na Figura 14, nos tempos finais de secagem das fatias de mamão tratadas com o revestimento probiótico. Resultados semelhantes em termos de aspecto visual foram relatados em fatias de mamão formosa (GERMER et al., 2014) e em cubos de mamão (BARRAGÁN-IGLESIAS et al., 2019).

Na Tabela 13, estão resumidos os dados obtidos para os parâmetros de cor das fatias de mamão *in natura* e submetidas ao processo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, sem a aplicação do revestimento comestível (controle) e com o revestimento probiótico.

Tabela 13. Parâmetros de cor das fatias de mamão *in natura* e desidratadas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Experimentos	Parâmetros					
	L*	a*	b*	C	h°	ΔE
<i>In natura</i> -controle	60,93 ± 1,57 a	36,77 ± 1,13 b	62,03 ± 1,65 a	72,34 ± 1,76 abc	27,17 ± 0,59 a	-
<i>In natura</i> – revestimento probiótico	58,05 ± 0,94 b	47,51 ± 0,94 a	61,75 ± 1,93 a	77,96 ± 1,38 a	22,13 ± 1,44 a	-
I	60,33 ± 1,65 a	37,45 ± 4,33 b	59,35 ± 1,71 a	70,58 ± 1,54 abc	25,75 ± 2,87 a	10,58 ± 2,12 a
II	53,85 ± 0,83 b	39,30 ± 2,88 a	59,93 ± 1,40 a	69,14 ± 0,87 abc	29,00 ± 1,68 a	14,33 ± 1,98 a
III	60,15 ± 4,25 a	33,15 ± 2,56 b	58,50 ± 4,85 a	67,62 ± 3,58 bc	27,00 ± 2,80 a	14,07 ± 3,50 a
IV	49,10 ± 0,52 b	37,40 ± 1,32 a	57,00 ± 0,73a	68,20 ± 0,29 bc	26,75 ± 1,25 a	14,18 ± 1,76 a
V	60,05 ± 5,48 a	37,58 ± 2,78 b	57,05 ± 7,38 a	75,91 ± 2,04 ab	28,75 ± 2,29 a	18,69 ± 3,40 a
VI	49,53 ± 2,42 b	38,50 ± 2,08 a	53,35 ± 2,01 a	65,91 ± 1,79 c	23,25 ± 1,49 a	13,77 ± 2,23 a

Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ($p < 0,05$).

I – Controle 50°C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

Os valores de L^* das fatias de mamão reflete o observado na análise qualitativa do seu aspecto visual. Observando que a aplicação do revestimento probiótico influenciou significativamente ($p < 0,05$) a luminosidade das fatias. Analisando os dados apresentados na Tabela 13, observamos que a amostra controle apresentou valores superiores (fatias mais claras) comparado as amostras com aplicação do revestimento probiótico. Islam et al. (2019) apresentaram valores para o parâmetro L^* para o mamão fresco de $65,72 \pm 2,12$, semelhante ao observado nesse estudo, em que foi visto valores entre 60,9933 e 58,0458 para o mamão *in natura*. Já quando avaliado o mamão seco, os mesmos autores relatam a diminuição significativa do parâmetro L^* , sendo menor nas amostras que receberam o revestimento comestível. Ao contrário do que foi observado nesse estudo, no qual a diminuição dos valores de L^* não foi significativa, porém nas amostras que receberam o revestimento probiótico notou-se uma tendência maior ao escurecimento com a secagem, o que pode estar relacionado com a estrutura vegetal da cultivar estudada e seu estágio de maturação, como também as propriedades do material utilizado na elaboração do revestimento aplicado.

As fatias de mamão *in natura* com o revestimento probiótico apresentou o maior valor de a^* (47,5125). O parâmetro positivo a^* mede a intensidade da cor vermelho. Analisando esse parâmetro verificou-se um efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$) entre os tratamentos aplicados nas fatias de mamão *in natura* e secas. Já o parâmetro b^* que mede a cor amarela, não apresentou efeito significativo entre os tratamentos e o processo de secagem. Embora autores como, Silva et al. (2016) e Silva Júnior et al. (2018), nos estudos da influência do pré-tratamento de ultrassom em melão e mamão secos, respectivamente, apresentarem valores superiores de a^* e b^* dos frutos secos comparado ao fresco, relacionando essas alterações na cor com o processo de secagem. Nesse estudo o efeito da secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C não foram significativos. As alterações na cor das fatias de mamão podem sofrer divergências conforme o estágio de maturação dos frutos, variedade, presença de danos mecânicos e ou fungos e local de produção.

O parâmetro croma C refere-se à saturação e está diretamente ligada a concentração de pigmentos corantes, percebida como intensidade da cor. Valores altos indicam maior pureza da cor e nitidez, fato observado nas fatias de mamão *in natura*, diferindo significativamente ($p < 0,05$) das fatias secas (Tabela 13). Foi verificado o efeito da interação entre os tratamentos e a temperatura de secagem sobre os valores do croma, sendo o maior valor registrado nas fatias de mamão *in natura* com revestimento

probiótico (77,9575) e o menor valor das fatias de mamão secas a 70 °C com aplicação do revestimento probiótico (65,9125). A perda do pigmento de cor pode ser devido a degradação dos pigmentos carotenoides, escurecimento não enzimático causado pela reação de Maillard e formação de pigmentos marrons durante a secagem em temperatura mais alta (ISLAM et al., 2019).

Os valores obtidos para ângulo h° (hue) define a matriz de cor das fatias de mamão como avermelhada, uma vez que os dados apresentados na Tabela 13 encontra-se entre 0 e 90°. A aplicação do revestimento comestível e a secagem em diferentes temperaturas não resultaram em alterações significativas para este parâmetro, assim como, para a variação (ΔE) das fatias secas.

5.9. Perfil de textura

O perfil de textura das fatias de mamão obtidas nas diferentes condições de processo está sumarizado na Tabela 14.

Tabela 14. Perfil de textura das fatias de mamão secas.

Experimento	Firmeza (N)	Coesividade	Gomosidade	Mastigabilidade
I	9,12 ± 0,22 b	0,59 ± 0,10 a	5,35 ± 0,96 b	5,34 ± 0,96 b
II	7,99 ± 0,57 b	0,71 ± 0,03 a	5,67 ± 0,34 b	5,67 ± 0,34 b
III	10,00 ± 1,95 ab	0,72 ± 0,05 a	7,12 ± 1,40 ab	7,12 ± 1,39 ab
IV	15,83 ± 1,09 ab	0,69 ± 0,03 a	10,92 ± 0,47 ab	10,92 ± 0,47 ab
V	15,71 ± 1,18 a	0,55 ± 0,06 a	8,62 ± 0,70 ab	8,62 ± 0,70 ab
VI	20,11 ± 4,11 a	0,65 ± 0,04 a	13,17 ± 3,06 a	13,16 ± 3,06 a

Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ($p < 0,05$).

I – Controle 50 °C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

Nota-se ao analisar os dados da Tabela 14, que a temperatura influenciou significativamente a firmeza, gomosidade e mastigabilidade das fatias de mamão secas. A aplicação do revestimento probiótico influenciou nos parâmetros gomosidade e mastigabilidade, sendo observado uma tendência do aumento desses parâmetros com a aplicação do revestimento probiótico.

A firmeza é um importante atributo de textura utilizado para investigar o endurecimento da superfície em frutas secas que está relacionado com a força exercida pela mastigação durante a alimentação (GUINÉ; BARROCA, 2012). O aumento da

firmeza como resultado ao incremento da temperatura também foi relatado por Islam et al. (2019) e Barragán-Iglesias et al. (2019) ao estudar o perfil de textura de mamão seco.

A coesividade não foi influenciada pelas condições do processo de secagem. A coesão é um parâmetro que reflete a tolerância a danos e a integridade da amostra. Sua definição sensorial é a força de contração interna da amostra (BELGHITH et al., 2016). Os valores obtidos nesse estudo para a coesão variaram entre 0,55 e 0,74. Segundo Silva et al. (2020a), não é indicado para esse parâmetro valores extremos, pois a aceitabilidade do consumidor é influenciada pelo mesmo.

A gomosidade e a mastigabilidade das fatias de mamão secas foram influenciadas tanto pela temperatura como pelo tratamento. A gomosidade assim como a mastigabilidade são medidas que relaciona em termos, a energia necessária para mastigar um alimento sólido. Valores menores de mastigabilidade são desejáveis para produtos desidratados porque a suculência dos frutos afeta a cavidade teórica e a sensação na boca (CHONG et al., 2009; SEERANGURAYAR et al., 2019). Nota-se na Tabela 14, que o aumento da temperatura resultou do aumento desses parâmetros devido à concentração das fibras com a remoção da água durante a secagem, sendo mais eficiente na temperatura de 70 °C. A aplicação do revestimento probiótico nas fatias de mamão, também apresentou um efeito significativo sobre os valores da gomosidade e mastigabilidade, o que pode ter relação com a formação de uma superfície mais resistente, nas amostras probióticas.

5.10. Reidratação

A taxa de reidratação é considerada uma indicação de dano físico da parede celular e do tecido durante a secagem. A taxa de reidratação depende principalmente da estrutura interna do produto e, em seguida, do volume de dano causado aos compostos de retenção de água durante a secagem (VEGA-GÁLVEZ et al., 2015). Na Tabela 15, um padrão na taxa de reidratação pode ser observado. Vê-se que, a temperatura de secagem e a aplicação do revestimento probiótico causaram efeitos significativos na taxa de reidratação das fatias de mamão.

Tabela 15. Propriedades físicas das fatias de mamão nas diferentes condições do processo.

Experimentos	Reidratação	Densidade aparente (g cm ⁻³)	Densidade sólida (g cm ⁻³)	Porosidade (%)
I	4,18 ± 0,00 e	517,49 ± 0,3×10 ⁻⁵ a	583,85 ± 0,3×10 ⁻⁵ a	11,37 ± 3,3×10 ⁻⁵ b
II	4,29 ± 0,02 d	437,03 ± 0,2×10 ⁻⁵ e	496,39 ± 0,3×10 ⁻⁵ d	11,96 ± 2,8×10 ⁻⁵ a
II	4,40 ± 0,01 c	473,46 ± 0,2×10 ⁻⁵ c	532,57± 0,3×10 ⁻⁵ c	11,10 ± 2,6×10 ⁻⁵ d
IV	4,28 ± 0,00 d	473,41 ± 0,2×10 ⁻⁵ c	533,03 ± 0,2×10 ⁻⁵ c	11,18 ± 2,2×10 ⁻⁵ c
V	5,32 ± 0,01 a	444,37 ± 0,2×10 ⁻⁵ d	486,14± 0,2×10 ⁻⁵ e	8,59 ± 1,9×10 ⁻⁵ f
VI	4,93 ± 0,01 b	499,46 ± 0,3×10 ⁻⁵ b	556,63± 0,3×10 ⁻⁵ b	10,27 ± 2,9×10 ⁻⁵ e

Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes (p <0,05).

I – Controle 50 °C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

Na Figura 15, observa-se que a razão de reidratação das amostras tratadas com o revestimento probiótico foi relativamente menor do que a razão de reidratação das amostras controle. A proporção de reidratação mais alta indica a capacidade de reidratação mais rápida do produto seco. Nas amostras com o revestimento comestível, o processo de reidratação foi mais lento. As amostras revestidas formaram uma fina camada na superfície externa do produto, é por isso que houve menos danos às células, sendo assim, esse efeito atribuído ao revestimento probiótico à menor taxa de reidratação (ISLAM et al., 2019).

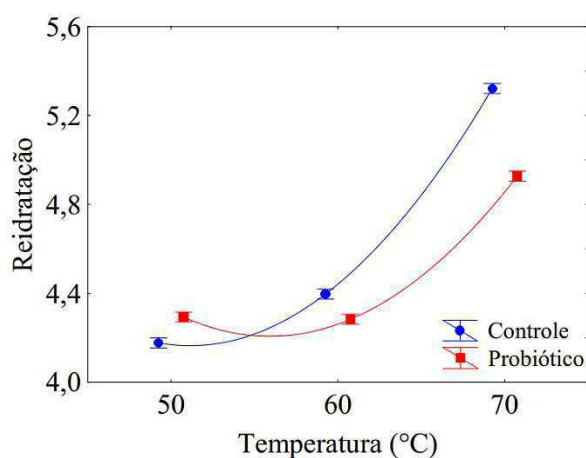


Figura 15. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem na reidratação das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $4,6016 - 0,7849 \times T + 0,3525 \times T^2$ e probiótico = $5,0345 - 1,0406 \times T + 0,3271 \times T^2$.

A razão de reidratação aumentou de forma proporcional ao aumento da temperatura de secagem das fatias de mamão. A capacidade de reidratação das amostras secas em temperaturas de secagem mais altas podem ser associadas à microestrutura das amostras. As amostras secas a 70 °C têm estrutura mais porosa do que amostras secas a 50 °C, e essa porosidade permite a maior penetração de água (ARAL; BEŞE, 2016). Resultados semelhantes foram relatados para a cinética de reidratação de frutos de *Rosa pimpinellifolia* (PASHAZADEH; ZANNOU; KOCA, 2020) e reidratação de mamão revestidos com amido (ISLAM et al., 2019).

5.11. Densidade aparente e sólida

Analisando os dados da Tabela 15, constatou-se que o revestimento probiótico, assim como, a temperatura de secagem influenciou significativamente os valores da

densidade aparente e sólida. Nota-se que as amostras revestidas apresentaram um comportamento diferente das amostras controle, apresentando maiores valores com o aumento da temperatura (Figura 16).

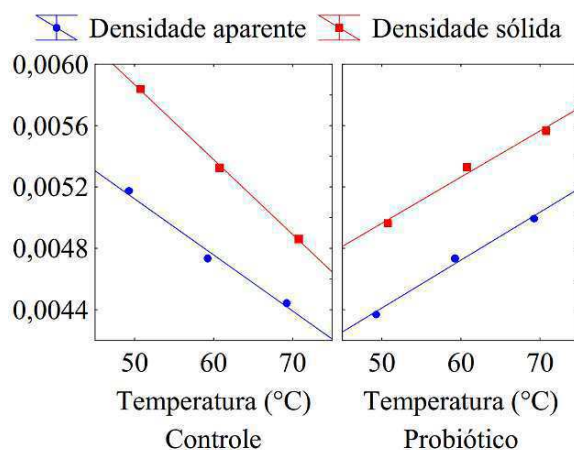


Figura 16. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nas densidades aparente e sólida das fatias de mamão, com ajuste das equações: densidade aparente = $0,0055 - 0,0004 \times T$ e densidade sólida = $0,0064 - 0,0005 \times T$.

O comportamento decrescente das amostras controle com o aumento da temperatura, pode estar relacionado ao maior encolhimento das fatias não tratadas com o processo de secagem. Diferentemente do que foi observado para as amostras com o revestimento probiótico, o que pode ser atribuído maior conservação da estrutura da fatia. Além disso, com o aumento da temperatura, foi visto a formação de bolhas de ar que causaram alterações no volume das fatias em temperaturas altas, por isso, foi constatado o aumento da densidade aparente e sólida nas temperaturas mais elevadas para as fatias revestidas. O aumento da densidade devido a formação de bolhas, também foi relatado por Pandey et al. (2020). Efeito semelhante ocorreu no estudo da secagem de fatias de banana usando um pré-tratamento com revestimento comestível em um sistema ultrassônico (DEHSHEIKH; DINANI, 2019).

5.12. Porosidade

A porosidade é a razão entre a densidade aparente e a densidade sólida, portanto, qualquer alteração nessas medidas resulta em alterações nos valores da porosidade. Avaliando os valores apresentados na Tabela 15, observa-se que a aplicação do

revestimento e a temperatura de secagem influenciaram significativamente ($p < 0,05$) a porosidade das fatias de mamão secas.

As fatias de mamão com revestimento probiótico apresentaram maior porosidade, comparado as fatias controle (Figura 17). O filme formado na superfície externa das fatias de mamão impede o encolhimento das fatias, como foi visto na Figura 13, aumenta a densidade aparente e sólida (Figura 16) bem como a porosidade (Figura 17), em comparação as amostras controle. Semelhante ao nosso achado, os resultados apresentados por Dehsheikh e Dinani (2019) indicaram o aumento da porosidade com aplicação do pré-tratamento com revestimento em banana usando carboximetilcelulose em um sistema ultrassônico antes da secagem.

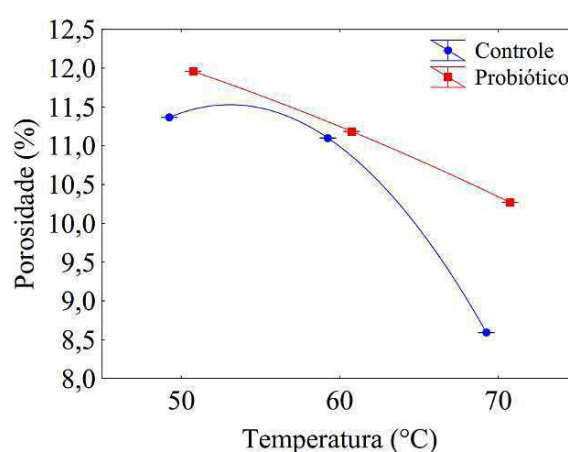


Figura 17. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem na porosidade das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $9,61 + 2,93 \times T - 1,12 \times T^2$ e probiótico = $12,63 - 0,55 \times T - 0,07 \times T^2$.

Temperaturas altas de secagem provocaram resultados semelhantes para as fatias de mamão revestidas e controle, onde o aumento da temperatura causou a redução desse parâmetro. Diferentemente do verificado nesse estudo, Shi et al. (2020) observaram que a porosidade de fatias de banana aumentou com a elevação da temperatura de secagem por radiação infravermelha, no entanto, esse comportamento observado para as fatias de mamão pode estar relacionado à estrutura do produto, geometria e também a formação de bolhas de vapor de água formada durante a secagem, especialmente nas secagens ocorridas nas temperaturas de 60 e 70 °C.

5.13. Características físico-químicas das fatias de mamão

Os efeitos da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nas características físico-químicas são resumidos na Tabela 16.

O revestimento das fatias de mamão resultou na redução significativa do pH, de 5,7 (*in natura*) para 5,5 na amostra controle seca a 70 °C. Relacionado ao pH, a acidez aumentou nas amostras secas. Nota-se na Tabela 16, que as amostras secas apresentaram maior acidez comparada a amostra *in natura*, resultado da concentração dos ácidos e compostos orgânicos com a remoção da água. Apesar da concentração dos compostos das fatias de mamão devido ao processo de secagem, observou-se que a aplicação do revestimento comestível contribuiu para o aumento da acidez. A tendência de aumento da acidez e consequente redução do pH nas amostras revestidas, pode estar relacionada à composição do revestimento e metabólitos presentes na solução filmogênica devido ao processo de fermentação com o *Lactobacillus salivarius*. Os valores de pH e acidez encontrados para as fatias de mamão estão em concordância com os dados apresentados por Escamilla-García et al. (2018), ao avaliar os efeitos de um revestimento comestível baseado em quitosana e amido oxidado na vida útil de mamão; e por Yi et al. (2017), ao estudar os atributos de qualidade de manga, mamão e lascas de mamão submetidas a pré-tratamentos de secagem.

O teor de sólidos solúveis totais das fatias de mamão secas não diferiu estatisticamente ($p > 0,05$) das fatias de mamão *in natura*. Verifica-se ao analisar os dados da Tabela 16, que existe uma tendência de crescimento dos valores de sólidos solúveis totais nas amostras secas a 60 e 70 °C, respectivamente. Esse comportamento é mais visível quando analisamos os valores obtidos para as fatias de mamão com revestimento probiótico. A concentração dos sólidos solúveis totais em resposta ao aumento da temperatura de secagem, é um comportamento esperado, em vista da concentração dos componentes presentes no produto em função da remoção de água durante a operação de secagem. No entanto, notou-se que as fatias de mamão revestidas, apresentaram valores superiores as amostras controle, o que se deve a composição da solução filmogênica probiótica aplicada revestindo a superfície das fatias de mamão.

A aplicação do revestimento próbiótico nas fatias de mamão apresentou um efeito positivo para a produção de um lanche saudável rico em compostos funcionais. Nota-se ao estudar os dados apresentados na Tabela 16, que o filme formado na superfície das fatias de mamão protegeu os compostos fenólicos dos efeitos negativos resultantes da operação de secagem em temperaturas altas.

Tabela 16. Características físico-químicas das fatias de mamão *in natura* e secas nas diferentes condições de processo.

	Experimentos						
	<i>in natura</i>	I	II	III	IV	V	VI
pH	5,67 ± 0,03 a	5,60 ± 0,00 ab	5,53 ± 0,13 b	5,60 ± 0,00 ab	5,50 ± 0,12 b	5,73 ± 0,07 ab	5,47 ± 0,09 b
Acidez (% ácido cítrico)	0,18 ± 0,00 b	0,58 ± 0,03 a	0,59 ± 0,00 a	0,55 ± 0,04 a	0,57 ± 0,05 a	0,55 ± 0,02 a	0,58 ± 0,04 a
Sólidos solúveis (°Brix)	8,60 ± 1,17 a	7,07 ± 0,03 a	7,30 ± 0,30 a	7,23 ± 0,03 a	7,90 ± 0,00 a	7,20 ± 0,00 a	8,06 ± 0,03 a
Compostos fenólicos (mg EAG por 100 g ⁻¹)	37,35 ± 0,14 f	103,81 ± 0,24 a	81,75 ± 0,26 e	86,09 ± 0,46 d	94,65 ± 0,13 b	87,37 ± 0,13 c	95,43 ± 0,25 b
Flavonoides totais (mg por 100 g ⁻¹)	1,31 ± 0,00 g	10,03 ± 0,00 a	6,98 ± 0,01 d	8,36 ± 0,00 b	5,67 ± 0,01 e	7,12 ± 0,00 c	4,89 ± 0,01 f
Antocianinas (mg por 100 g ⁻¹)	0,07 ± 0,00 g	1,31 ± 0,00 c	0,65 ± 0,00 d	1,37 ± 0,00 b	0,57 ± 0,00 e	1,48 ± 0,00 a	0,45 ± 0,00 f
Carotenoides (mg por 100 g ⁻¹)	0,09 ± 0,00 f	0,38 ± 0,00 b	0,29 ± 0,00 c	0,38 ± 0,00 b	0,27 ± 0,00 e	0,44 ± 0,00 a	0,28 ± 0,00 d
Clorofila total (mg por 100 g ⁻¹)	0,17 ± 0,00 c	0,90 ± 0,00 a	0,23 ± 0,00 b	0,88 ± 0,02 a	0,16 ± 0,00 c	0,21 ± 0,00 b	0,13 ± 0,00 d

Valores com letras diferentes na mesma linha são significativamente diferentes ($p < 0,05$).

I – Controle 50 °C, II – Revestimento probiótico 50 °C, III – Controle 60 °C, IV – Revestimento probiótico 60 °C, V – Controle 70 °C, VI – Revestimento probiótico 70 °C.

Na Figura 18, é possível visualizar o aumento dos compostos fenólicos com o aumento da temperatura para as amostras com o revestimento probiótico. Esse fato é resultado da concentração dos compostos com o aumento da remoção de água ocorrida em temperaturas mais elevadas. Enquanto, para as fatias de mamão controle, o aumento da temperatura de secagem resultou na degradação dos compostos fenólicos presentes no produto. Essa degradação foi maior na temperatura de 70 °C (Figura 18). No entanto, em comparação a amostra *in natura*, houve uma concentração dos compostos fenólicos em ambas as amostras revestidas e controle.

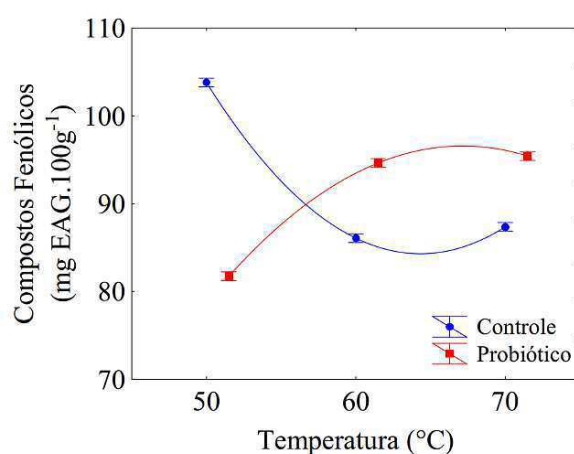


Figura 18. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nos compostos fenólicos das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $140,54 - 46,23 \times T + 9,50 \times T^2$ e probiótico = $51,65 + 32,88 \times T - 6,06 \times T^2$.

Na Tabela 16, encontramos os valores obtidos para o conteúdo de flavonoides totais e antocianinas nas fatias de mamão *in natura* e seco. Ao analisar os dados obtidos, foi verificado um aumento dos flavonoides e antocianinas com a operação de secagem para as amostras controle e com o revestimento comestível. Os maiores valores encontrados para as amostras secas comparado a amostra *in natura*, deve-se à concentração dos compostos pela remoção da água, assim como, a provável geração de flavonoides após a secagem, causado provavelmente devido as modificações estruturais ocorridas durante a secagem, que facilitariam a liberação de alguma classe de compostos fenólicos (VEGA-GÁLVEZ et al., 2019; 2020). Valores semelhantes aos achados nesse estudo, foram relatados por Annegowda et al. (2014), Vega-Gálvez et al. (2020) e Vega-Gálvez et al. (2019) ao estudarem o conteúdo polifenólico de mamão.

A temperatura de secagem, assim como, o revestimento probiótico influenciaram significativamente os teores de flavonoides totais e antocianinas nas fatias de mamão. Na Figura 19, verificou-se que o aumento da temperatura de secagem resultou na redução significativa ($p < 0,05$) nos valores para flavonoides para as amostras controle e revestidas. No entanto, a amostra controle apresentou uma menor redução dos teores de flavonoides e antocianinas comparado as amostras revestidas, para todas as temperaturas. Valores inferiores das amostras com o revestimento probiótico pode estar relacionado à barreira formada pelo filme comestível nas amostras secas, causando melhor conservação da estrutura das fatias de mamão, o que provavelmente dificultou a liberação de alguns compostos dessa classe.

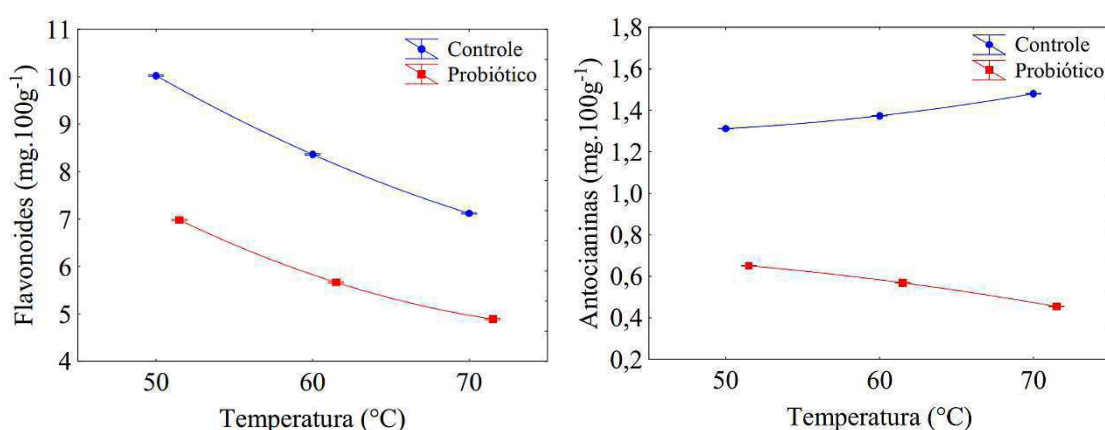


Figura 19. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nos flavonoides das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $12,11 - 2,29 \times T + 0,21 \times T^2$ e probiótico = $9,16 - 2,20 \times T + 0,27 \times T^2$, e antocianinas: controle = $1,29 - 0,01 \times T + 0,02 \times T^2$ e probiótico = $0,70 - 0,03 \times T - 0,02 \times T^2$

O mamão tem uma cor laranja avermelhada muito pronunciada quando madura, características da fruta, indicando a presença de carotenoides. Licopeno, β -criptoxantina e β -caroteno foram identificados com os principais carotenoides presentes no mamão, sendo o licopeno o mais prevalente (SILVA JÚNIOR et al., 2018; UDOMKUN et al., 2015). Pesquisas dos teores de carotenoides totais em mamão relatam valores diferente, entre 3,24 (mg por 100g⁻¹ DM) (SILVA JÚNIOR et al., 2018), 72 a 2,72 (μ g por 100g⁻¹) (SCHWEIGGERT et al., 2011b) e 6214 (μ g por 100g⁻¹) (SCHWEIGGERT et al., 2011a). Na Tabela 17, notou-se valores dentro dos valores já mencionados em estudos anteriores. No entanto, algumas diferenças podem ser atribuídas a variedades analisadas, práticas

agrícolas, exposição solar, área de produção, estágio de maturação, manejo pós-colheita e metodologia utilizada para a análise (SILVA JÚNIOR et al., 2018).

Na Figura 20, verifica-se os efeitos da aplicação do revestimento comestível e da temperatura de secagem nos teores de carotenoides totais das fatias de mamão. A operação de secagem e o aumento da temperatura resultou no acréscimo dos valores de carotenoides totais para a amostra controle. Entretanto, para as amostras com o revestimento comestível, a operação de secagem resultou no aumento desses valores, porém, a elevação da temperatura de secagem resultou na degradação significativa do conteúdo de carotenoides totais.

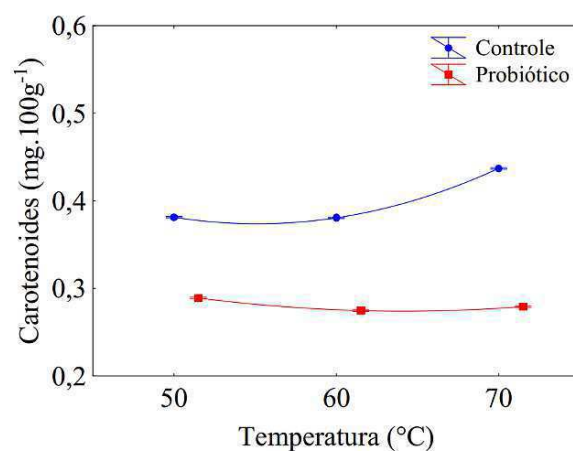


Figura 20. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem nos carotenoides das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $0,44 - 0,09 \times T + 0,09 \times T^2$ e probiótico = $0,33 - 0,05 \times T + 0,01 \times T^2$.

O comportamento da amostra controle com o aumento da temperatura de secagem reflete a concentração dos compostos com a maior remoção de água ocorrida nas temperaturas mais elevadas. A amostra com o revestimento probiótico apresentou um comportamento semelhante ao relatado por Silva Júnior et al. (2018) ao estudar a influência do ultrassom e da secagem assistida a vácuo nos parâmetros de qualidade do mamão, em que observaram que as amostras secas apresentaram uma redução dos carotenoides em altas temperaturas. A redução dos carotenoides com o processo de secagem em altas temperaturas e por longos períodos de tempo se deve a esses pigmentos os quais são altamente instáveis e suscetíveis a degradação ou isomerização (GOULA; ADAMOPOULOS, 2010).

Durante o amadurecimento, a cor dos frutos de mamão muda de verde para amarelo, e sua polpa pode apresentar uma coloração laranja avermelhada quando

totalmente madura. Essas mudanças envolve a degradação da clorofila ou alternâncias quantitativas e qualitativas dos pigmentos verdes em outros pigmentos (LATA et al., 2018; SALVADOR; SANZ; FISZMAN, 2007). Os frutos de mamão analisados nesse estudo, foram utilizados no estágio de maturação correspondente a ¼ de maduro, que compreende entre 15-25% da casca amarela (Figura 2). Nesse estágio, o fruto *in natura* apresentou um teor de clorofila total de 0,17 mg por 100g⁻¹. O teor de clorofila total é variável conforme a variedade do mamão e o estágio de maturação do fruto no momento da análise.

A operação de secagem concentrou esses pigmentos presentes nas fatias de mamão, sendo observado na Figura 21, uma maior preservação desses pigmentos nas amostras controle, nas temperaturas de 50 e 60 °C. Verificou-se que as amostras com o revestimento probiótico apresentou maior redução do teor de clorofila total. A redução desse teor nas amostras com o revestimento probiótico foi significativamente maior, já quando analisado o efeito da secagem na temperatura de 50 °C, reduzindo gradativamente com o aumento da temperatura. Embora a amostra controle tenham apresentado um teor de clorofila maior nas temperaturas de 50 e 60 °C, quando analisado o efeito da secagem na temperatura de 70 °C, a redução dos valores desses pigmentos foi expressiva, aproximando-se do observado na mesma temperatura para as amostras com revestimento probiótico.

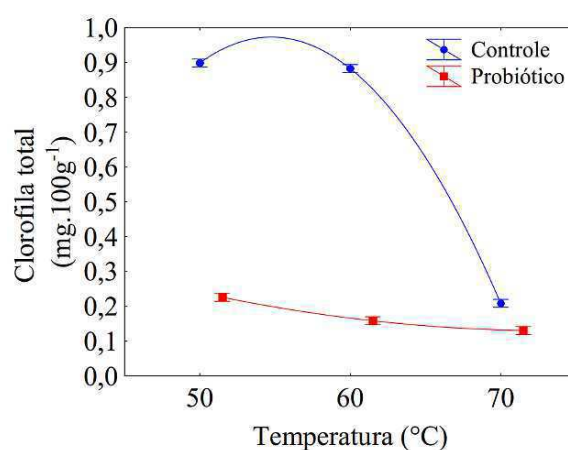


Figura 21. Efeito da aplicação do revestimento probiótico e das temperaturas de secagem na clorofila total das fatias de mamão, com ajuste das equações: controle = $0,26 + 0,97 \times T - 0,33 \times T^2$ e probiótico = $0,35 - 0,13 \times T + 0,02 \times T^2$.

6. CONCLUSÕES

O crescimento do *Lactobacillus salivarius* em soluções filmogênicas à base de gelatina e inulina mostrou-se como uma alternativa viável para a incorporação de bactérias probióticas em diversos produtos alimentícios. A avaliação dos impactos das condições do processo no desenvolvimento celular é fundamental para otimizar e tornar o processo aplicável a indústria. Esse estudo mostrou que as condições ótimas para o desenvolvimento das células probiótica na solução filmogênica foram: 1% de gelatina combinado a 4% de inulina, fermentada na temperatura de 45 °C.

A modelagem matemática da solução filmogênica obtida nas condições ótimas mostrou uma boa adequação do modelo proposto neste trabalho para descrever a produção de células e consumo de substrato durante a fermentação a 45 °C da solução filmogênica. A análise realizada através do Student's t-test dos parâmetros obtidos por ajuste dos modelos primários citados neste trabalho, e amplamente utilizados na microbiologia preditiva, mostrou a inadequação de tais modelos para descrever o crescimento celular e o consumo de substrato durante a fermentação da solução filmogênica com *Lactobacillus salivarius*. Foi, então, proposto um modelo simples, com três parâmetros de ajuste, que descreveu bem a produção de células ($R^2 = 0,981$) e o consumo de substrato ($R^2 = 0,991$). Para esse modelo, foi constatado que todos os três parâmetros obtidos por ajuste de curvas podem ser considerados estatisticamente significativos.

A aplicação do *L. salivarius* por meio da solução filmogênica nas fatias de mamão apresentou resultados satisfatórios, afirmando o potencial promissor do método na incorporação do probiótico para o desenvolvimento de fatias de mamão probióticas secas. Apesar da operação de secagem convectiva ser um processo longo, em temperaturas relativamente altas para o micro-organismo, a maior redução da viabilidade do probiótico foi observada nos primeiros 200 min do processo, com maiores reduções obtidas na temperatura de 70 °C.

Foi constatado através da análise do Student's t-test, do coeficiente de determinação e qui-quadrado, que o modelo de Page foi o mais adequado para descrever o processo de secagem das fatias de mamão controle e com o revestimento comestível nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

O mecanismo de difusão não foi influenciado com aplicação da solução filmogênica com revestimento probiótico nas fatias de mamão, indicando o que a

formulação da solução filmogênica foi adequada para aplicação com pré-tratamento a secagem, uma vez que, permitiu o fluxo de vapor d'água durante a operação de secagem. Porém, a aplicação do revestimento probiótico exigiu maior energia de ativação e resultou no aumento da entalpia e entropia que tendeu a reduzir com o aumento da temperatura de secagem.

A aplicação do revestimento probiótico antes do processo de secagem reduziu o encolhimento das fatias de mamão em todas as temperaturas, resultando em amostras com maior conservação da estrutura das fatias de mamão.

A maior retenção dos compostos fenólicos ocorreu nas amostras com o revestimento probiótico. Esse resultado indica um grande potencial do uso de soluções filmogênicas para o revestimento de fatias de mamão antes do processo de secagem. Por outro lado, a amostra controle apresenta maiores valores dos teores de flavonoides, antocianinas, carotenoides totais e clorofila total.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o efeito da agitação, assim como a alteração do pH, no desenvolvimento de soluções filmogênicas probiótica.
- Relacionar o efeito da temperatura e do pH no crescimento de culturas probióticas na solução filmogênica através do uso de modelos matemáticos secundários e terciários.
- Avaliar o efeito da aplicação do revestimento probiótico como pré-tratamento para secagem de fatias de fruta com diferentes espessuras e geometria.
- Comparar diferentes técnicas de secagem e o efeito da aplicação do revestimento probiótico na eficiência do processo e preservação da qualidade nutricional do produto.
- Analisar as características sensoriais do produto desenvolvido com uma equipe previamente treinada, para identificação do perfil sensorial, intenção de compra, preferência e aceitação pelo público alvo.
- Avaliar a estabilidade do produto probiótico durante o armazenamento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 73, n. 1, p. 75–84, 1 mar. 2006.

ALCÂNTARA, L. O.; MARTINS, M. E. O.; SOUSA, J. R.; CERQUEIRA, M. Â.; SILVA, A. L. C.; SOUZA FILHO, M. S. M.; SOUZA, B. W. S. Wettability of edible coatings on Nile tilapia fillets (*Oreochromis niloticus*). **Journal of Food Engineering**, v. 247, p. 152–159, 1 abr. 2019.

ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; SILVA, V. M. A.; RIBEIRO, V. H. A.; BARROS, E. R.; CAVALCANTE, J. A.; QUEIROGA, A. P. R.; LUÍZ, M. R.; NASCIMENTO, A. R.; BARBOSA DO NUNES, J. S. Influência da espessura na cinética de secagem de fatias de beterraba. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, p. e18942940, 18 mar. 2020.

AMADO, L. R. **Estudo do efeito de cobertura comestível e secagem intermitente sobre a qualidade de manga desidratada**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 173 f. 2017.

ANNEGOWDA, H. V.; BHAT, R. Composition of papaya fruit and papaya cultivars. In: **Nutritional Composition of Fruit Cultivars**. Elsevier Inc., p. 497–516, 2016.

ANNEGOWDA, H. V. BHAT, R.; YEONG, K. J.; LIONG, M.; KARIM, A. A.; MANSOR, S. M. Influence of drying treatments on polyphenolic contents and antioxidant properties of raw and ripe papaya (*Carica papaya* L.). **International Journal of Food Properties**, v. 17, n. 2, p. 283–292, 7 fev. 2014.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis Assoc Anal Chem**, 1990. Acesso em: 18 jun. 2020

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis Assoc Anal Chem**, 1997. Acesso em: 18 jun. 2020

APOLINÁRIO, A. C.; DAMASCENO, B. P. G. de L.; BELTRÃO, N. E. de M.; PESSOA, A.; CONVERTI, A.; SILVA, J. A. da. Inulin-type fructans: A review on

different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, n. 1, p. 368–378, 30 jan. 2014.

ARAL, S.; BEŞE, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, v. 210, p. 577–584, 2016.

AZEREDO, H. M. C. Edible coatings. In RODRIGUES, S., FERNANDES, F. A. N. (Eds.), **Advances in fruit processing technologies**, Boca Raton: CRC Press Inc, p. 345–361, 2012.

BARANYI, J.; ROBERTS, T. A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. **International Journal of Food Microbiology**, v. 23, n. 3–4, p. 277–294, nov. 1994.

BARRAGÁN-IGLESIAS, J.; RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, J.; SABLANI, S. S.; MÉNDEZ-LAGUNAS, L. L. Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) pretreated with calcium and osmotic dehydration. **Drying Technology**, v. 37, n. 7, p. 906–919, 19 maio 2019.

BELGHITH FENDRI, L.; CHAARI, F.; MAALOUL, M.; KALLEL, F.; ABDELKAFI, L.; ELLOUZ CHAABOUNI, S.; GHRIBI-AYDI, D. Wheat bread enrichment by pea and broad bean pods fibers: Effect on dough rheology and bread quality. **LWT-Food Science and Technology**, v. 73, p. 584–591, nov. 2016.

BENÍTEZ, R. O. Perdas e desperdícios de alimentos na América Latina e no Caribe. **Escritório Regional da FAO para a América Latina e o Caribe**, 2015.

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K.; BLAIR, J. M.; MALLINCKRODT, A. J.; MCKAY, S. Data reduction and error analysis for the physical sciences. **Computers in Physics**, v. 7, n. 4, p. 415, 1993.

BEZERRA, C. V.; MELLER DA SILVA, L. H.; CORRÊA, D. F.; RODRIGUES, A. M.C. A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 85, p. 750–755, 1 jun. 2015.

BOUDHRIOUA, N.; MICHON, C.; CUVELIER, G.; BONAZZI, C. Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 2, p. 115–121, 1 nov. 2002.

BRASIL. Resolução da Diretoria Colegiada RDC N° 241, de 26 de julho de 2018. **Diário Oficial da União**, 2018.

CALVACHE, J. N.; CUETO, M.; FARRONI, A.; PLA, M. de E.; GERSCHENSON, L. N. Antioxidant characterization of new dietary fiber concentrates from papaya pulp and peel (*Carica papaya* L.). **Journal of Functional Foods**, v. 27, p. 319–328, 1 dez. 2016.

CAO, T. L.; YANG, S. Y.; SONG, K. BIN. Development of burdock root inulin/chitosan blend films containing oregano and thyme essential oils. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 1, p. 131, 3 jan. 2018.

CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 223, p. 152–167, 1 abr. 2018.

CEBI, N.; DURAK, M. Z.; TOKER, O. S.; SAGDIC, O.; ARICI, M. An evaluation of Fourier transforms infrared spectroscopy method for the classification and discrimination of bovine, porcine and fish gelatins. **Food Chemistry**, v. 190, p. 1109–1115, 30 jun. 2016.

CHANG, S. K.; ALASALVAR, C.; SHAHIDI, F. Review of dried fruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health benefits. **Journal of Functional Foods**, v. 21, p. 113–132, 1 mar. 2016.

CHEN, N. J.; MANENOI, A.; PAULL, R. E. Papaya postharvest physiology and handling - Problems and solutions. **Acta Horticulturae**, n. 740, p. 285–293, mar. 2005.

CHEN, S.; TANG, L.; SU, W.; WENG, W.; OSAKO, K.; TANAKA, M. Separation and characterization of alpha-chain subunits from tilapia (*Tilapia zillii*) skin gelatin using ultrafiltration. **Food Chemistry**, v. 188, p. 350–356, 24 abr. 2015.

CHONG, C. H.; LAW, C. L.; CLOKE, M.; ABDULLAH, L. C.; WAN DAUD, W. R. Drying models and quality analysis of sun-dried ciku. **Drying Technology**, v. 27, n. 9, p. 985–992, 18 ago. 2009.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M. N.A.; CHOU, S. K.; HO, J. C. Convective drying of agricultural products. Effect of continuous and stepwise change in drying air temperature. **Drying Technology**, v. 19, n. 8, p. 1949–1960, 2001.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Mathematical modelling for describing the drying process of the edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in thin layers. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 501–510, 2007.

COSTA, J. C. C. P.; BOLÍVAR, A.; VALERO, A.; CARRASCO, E.; ZURERA, G.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, F. Evaluation of the effect of *Lactobacillus sakei* strain L115 on *Listeria monocytogenes* at different conditions of temperature by using predictive interaction models. **Food Research International**, v. 131, n. 108928, p. 108928, maio 2020.

CUEVAS-GONZÁLEZ, P. F.; LICEAGA, A. M.; AGUILAR-TOALÁ, J. E. Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications. **Food Research International**, v. 136, p. 109502, out. 2020.

CUQ, B.; GONTARD, N.; GUILBERT, S. Edible films and coatings as active layers. In: **Active Food Packaging**. Springer US, p. 111–142, 1995.

DAI, J.; XIAO, H.; ZHANG, L.; CHU, M.; QIN, W.; WU, Z.; HAN, D.; LI, Y.; LIU, Y.; YIN, P. Drying characteristics and modeling of apple slices during microwave intermittent drying. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 6, 6 out. 2019.

DANTAS, J.; JUNGHANS, D.; LIMA, J. de. Mamão: O produtor pergunta, a Embrapa responde. 2013.

DEGHANI, S.; HOSSEINI, S. V.; REGENSTEIN, J. M. Edible films and coatings in seafood preservation: A review. **Food Chemistry**, v. 240, p. 505–513, 1 fev. 2018.

DEHSHEIKH, F. N.; DINANI, S. T. Coating pretreatment of banana slices using carboxymethyl cellulose in an ultrasonic system before convective drying. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 52, p. 401–413, abr. 2019.

DIAMANTE, L. M.; IHNS, R.; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, 2010.

DIANIN, I. B.; JR OLIVEIRA, A. G.; PIMENTEL, T. C.; FILHO HERNANDES, N.; COSTA, G. N. **Edible biofilms formulated with whey protein isolate and *L. Casei* probiotic culture: characterization and application in tomatoes and grapes.** CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. **Anais**. 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/333720348>>. Acesso em: 21 set. 2020

DOBSON, A.; COTTER, P. D.; ROSS, R. P.; HILL, C. Bacteriocin production: A probiotic trait? **Applied and Environmental Microbiology**, v. 78, n. 1, p. 1–6, 1 jan. 2012.

DOYMAZ, İ. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. **Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 1, p. 25–35, 17 jan. 2017.

DUAR, R. M.; LIN, X. B.; ZHENG, J.; MARTINO, M. E.; GRENIER, T.; PÉREZ-MUÑOZ, M. E.; LEULIER, F.; GÄNZLE, M.; WALTER, J. Lifestyles in transition: Evolution and natural history of the genus *Lactobacillus*. **FEMS Microbiology Reviews**, 2017.

EMSER, K.; BARBOSA, J.; TEIXEIRA, P.; MORAIS, A. M. M. B. de. *Lactobacillus plantarum* survival during the osmotic dehydration and storage of probiotic cut apple. **Journal of Functional Foods**, v. 38, p. 519–528, 2017.

ESCAMILLA-GARCÍA, M.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, M.; HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, H.; DELGADO-SÁNCHEZ, L.; GARCÍA-ALMENDÁREZ, B.; AMARO-REYES, A.; REGALADO-GONZÁLEZ, C. Effect of an edible coating based on chitosan and oxidized starch on shelf life of *Carica papaya* L., and its physicochemical and antimicrobial properties. **Coatings**, v. 8, n. 9, p. 318, 7 set. 2018.

FAKRUDDIN, M.; MAZUMDER, R. M.; SHAHNEWAJ, K.; MANNAN, B. Predictive microbiology: Modeling microbial responses in food. **Ceylon Journal of Science (Bio. Sci.)**, v. 40, n. 2, p. 121–131, 2011.

FALGUERA, V.; QUINTERO, J. P.; JIMÉNEZ, A.; MUÑOZ, J. A.; IBARZ, A. Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. **Trends in Food Science and Technology**, v. 22, n. 6, p. 292–303, 1 jun. 2011.

FARIAS, R. P.; GOMEZ, R. S.; SILVA, W. P.; SILVA, L. P. L.; OLIVEIRA NETO, G. L.; SANTOS, I. B.; CARMO, J. E. F.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer, and volume variations in banana slices during convective hot air drying: an experimental analysis. **Agriculture**, v. 10, n. 10, p. 423, 23 set. 2020.

FARINA, V.; PASSAFIUME, R.; TINEBRA, I.; SCUDERI, D.; SALETTA, F.; GUGLIUZZA, G.; GALLOTTA, A.; SORTINO, G. Postharvest application of aloe vera gel-based edible coating to improve the quality and storage stability of fresh-cut papaya. **Journal of Food Quality**, p. 10, 2020.

FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT**. 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 21 nov.2019.

FRANCIS, F. J. Analysis of anthocyanins. **Anthocyanins as Food Colors**, v. 1, p. 280, 1982.

FURTADO, L. L. **Viabilidade de bactérias probióticas em suco tropical de manga e sobrevivência das estirpes às condições gastrointestinais simuladas in vitro**. Tese (Doutorado) - Instituto Federal de Educação. p. 48, 2017

GERMEC, M.; KARHAN, M.; BIALKA, K. L.; DEMIRCI, A.; TURHAN, I. Mathematical modeling of lactic acid fermentation in bioreactor with carob extract. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 14, n. Jan, p. 254–263, 2018.

GERMER, S. P. M.; FERRARI, C. C.; LANCHA, J. P.; BERBARI, S. A. G.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M.; RUFFI, C. R. G. Influence of processing additives on the quality and stability of dried papaya obtained by osmotic dehydration and conventional air drying. **Drying Technology**, v. 32, n. 16, p. 1956–1969, 10 dez. 2014.

GIAMPIERI, F.; TULIPANI, S.; ALVAREZ-SUAREZ, J. M.; QUILES, J. L.; MEZZETTI, B.; BATTINO, M. The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. **Nutrition**, v. 28, n. 1, p. 9–19, 1 jan. 2012.

GILSENAN, P. M.; ROSS-MURPHY, S. B. Rheological characterisation of gelatins from mammalian and marine sources. **Food Hydrocolloids**, v. 14, n. 3, p. 191–195, 1 maio 2000.

GIONGO, L.; AJELLI, M.; PONCETTA, P.; RAMOS-GARCÍA, M.; SAMBO, P.; FARNETI, B. Raspberry texture mechanical profiling during fruit ripening and storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 149, p. 177–186, mar. 2019.

GIRAFFA, G.; CHANISHVILI, N.; WIDYASTUTI, Y. Importance of *lactobacilli* in food and feed biotechnology. **Research in Microbiology**, v. 161, n. 6, p. 480–487, 1 jul. 2010.

GOMEZ-GUILLEN, M. C.; GIMENEZ, B.; LOPEZ-CABALLERO, M. E.; MONTERO, M. P. Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review. **Food Hydrocolloids**. Elsevier, 1 dez. 2011. Acesso em: 7 out. 2020

GOMPERTZ, B. XXIV. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. In a letter to Francis Baily, Esq. F. R. S. & amp;c. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 115, n. 115, p. 513–583, 31 dez. 1825.

GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. Kinetic models of β -carotene degradation during air drying of carrots. **Drying Technology**, v. 28, n. 6, p. 752–761, 28 maio 2010.

GREENER, I. K.; FENNEMA, O. Evaluation of edible, bilayer films for use as moisture barriers for food. **Journal of Food Science**, v. 54, n. 6, p. 1400–1406, 1 nov. 1989.

GREGIRCHAK, N.; STABNIKOVA, O.; STABNIKOV, V. Application of lactic acid bacteria for coating of wheat bread to protect it from microbial spoilage. **Plant Foods for Human Nutrition**, v.75, p. 223-229, 2020.

GUINÉ, R. P. F.; BARROCA, M. J. Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 1, p. 58–63, jan. 2012.

HENDERSON, P.; SEABY, R. M.; SOMES, R. **Growth II. Pisces conservation ltd., lymington, england**, p. 97, 2006.

HIGUCHI, T.; SUZUKI, N.; NAKAYA, S.; OMAGARI, S.; YONEDA, M.; HANIOKA, T.; HIROFUJI, T. Effects of *Lactobacillus salivarius* WB21 combined with green tea catechins on dental caries, periodontitis, and oral malodor. **Archives of Oral Biology**, v. 98, n. July 2018, p. 243–247, 2019.

HUSSAIN, S. A.; PATIL, G. R.; YADAV, V.; BIJOY SINGH, R. R.; SINGH, A. K. Ingredient formulation effects on physico-chemical, sensory, textural properties and probiotic count of Aloe vera probiotic dahi. **LWT - Food Science and Technology**, v. 65, p. 371–380, 1 jan. 2016.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção Agrícola Municipal. 2018.

ILGIN, M.; GERMEC, M.; TURHAN, I. Inulinase production and mathematical modeling from carob extract by using *Aspergillus niger*. **Biotechnology Progress**, v. 36, n. 1, p. 1–13, 22 jan. 2019.

ISLAM, M. Z.; SAHA, T.; MONALISA, K.; HOQUE, M. M. Effect of starch edible coating on drying characteristics and antioxidant properties of papaya. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 13, n. 4, p. 2951–2960, 13 dez. 2019.

JANJARASSKUL, T.; KROCHTA, J. M. Edible packaging materials. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 1, p. 415–448, 2010.

JIANG, M.; LIU, S.; DU, X.; WANG, Y. Physical properties and internal microstructures of films made from catfish skin gelatin and triacetin mixtures. **Food Hydrocolloids**, v. 24, n. 1, p. 105–110, 1 jan. 2010.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 182–188, maio 2009.

JUNEJA, V. K.; MELENDRES, M. V.; HUANG, L.; SUBBIAH, J.; THIPPAREDDI, H. Mathematical modeling of growth of *Salmonella* in raw ground beef under isothermal conditions from 10 to 45 °C. **International Journal of Food Microbiology**, v. 131, n. 2–3, p. 106–111, maio 2009.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. **Journal of Stored Products Research**, v. 43, n. 2, p. 104–110, jan. 2007.

KARA, C.; DOYMAZ, İ. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of apple pomace. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 51, n. 7, p. 983–989, 18 jul. 2015.

KAVEH, M.; AMIRI CHAYJAN, R.; NIKBAKHT, A. M. Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 53, n. 6, p. 2045–2059, 1 jun. 2017.

KIM, J. C.; LEE, H. Y.; KIM, M.; LEE, H. J.; KANG, H. Y.; KIM, S. M. Preparation and characterization of chitosan/gelatin microcapsules containing triclosan. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 52, n. 1, p. 52–56, 1 set. 2006.

KRZYŚCIAK, W.; KOŚCIELNIAK, D.; PAPIEŻ, M.; VYHOUSKAYA, P.; ZAGÓRSKA-ŚWIEŻY, K.; KOŁODZIEJ, I.; BYSTROWSKA, B.; JURCZAK, A. Effect of a *Lactobacillus salivarius* probiotic on a double-species streptococcus mutans and candida albicans caries biofilm. **Nutrients**, v. 9, n. 11, p. 1242, 14 nov. 2017.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, n. 1, p. 48–57, 1 jan. 2014.

LACEY, A. M. L.; LÓPEZ-CABALLERO, M. E.; GÓMEZ-ESTACA, J.; GÓMEZ-GUILLÉN, M. C.; MONTERO, P. Functionality of *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium bifidum* incorporated to edible coatings and films. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 16, p. 277–282, 2012.

LAGO-VANZELA, E. S.; NASCIMENTO, P.; FONTES, E. A. F.; MAURO, M. A.; KIMURA, M. Edible coatings from native and modified starches retain carotenoids in pumpkin during drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 420–425, mar. 2013.

LAHTINEN, S. J. Probiotic viability – does it matter? **Microbial Ecology in Health & Disease**, v. 23, 18 jun. 2012.

LATA, D.; AFTAB, M. A.; HOMA, F.; AHMAD, M. D. S.; SIDDIQUI, M. W. Effect of eco-safe compounds on postharvest quality preservation of papaya (*Carica papaya* L.). **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 1, p. 8, 5 jan. 2018.

LEROY, F.; VUYST, L. de. A combined model to predict the functionality of the bacteriocin-producing *Lactobacillus sakei* strain CTC 494. **Applied and Environmental Microbiology**, 2003.

LI, C.; LI YING, N.; JING, L. da; CHUN QUAN, L.; YING PING, L.; CHUN JU, L.; JIANG FENG, S. Effects of different drying methods on quality, bacterial viability and storage stability of probiotic enriched apple snacks. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 1, p. 247–255, 2018.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, n. C, p. 350–382, 1 jan. 1987.

LIMA, L. L. C.; SILVA, D. J.; SILVA, L. E. B.; BARROS, R. P. Índice de germinação de sementes de duas variedades de mamão (*Carica papaya* L.) em substrato Bioplant®. **Diversitas Journal**, v. 3, n. 1, p. 45, 30 mar. 2018.

LIN, T. C.; CHEN, B. Y.; CHEN, C. Y.; CHEN, Y. S.; WU, H. Comparative analysis of spray-drying microencapsulation of *Bifidobacterium adolescentis* and *Lactobacillus acidophilus* cultivated in different growth media. **Journal of Food Process Engineering**, 2019.

LUIKOV, A. V. Analytical heat diffusion theory university of Illinois. **Department of Energy Engineering**, 1968.

MARFIL, P. H. M. **Microencapsulação de óleo de palma por coacervação complexa em matrizes de gelatina/goma arábica e gelatina/alginato**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), São José do Rio Preto, 6 out 2014.

MARTINS, W. F.; LONGHI, D. A.; DE ARAGÃO, G. M. F.; MELERO, B.; ROVIRA, J.; DIEZ, A. M. A mathematical modeling approach to the quantification of lactic acid bacteria in vacuum-packaged samples of cooked meat: Combining the TaqMan-based quantitative PCR method with the plate-count method. **International Journal of Food Microbiology**, v. 318, n. 108466, p. 108466, abr. 2020.

MCCLEMENTS, D. **Food emulsions: principles, practices, and techniques**. CRS press, 2015.

MCHUGH, T. H. Protein-lipid interactions in edible films and coatings. **Nahrung - Food**, v. 44, n. 3, p. 148–151, 1 maio 2000.

MECHMECHE, M.; KACHOURI, F.; YAGHLANE, H. B.; KSONTINI, H.; SETTI, K.; HAMDI, M. Kinetic analysis and mathematical modeling of growth parameters of *Lactobacillus plantarum* in protein-rich isolates from tomato seed. **Food Science and Technology International**, v. 23, n. 2, p. 128–141, 24 mar. 2017.

MELO, J. C. S.; PEREIRA, E. D.; OLIVEIRA, K. P.; COSTA, C. H. C.; FEITOSA, R. M. Study smell pepper drying kinetics in different temperature. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 09–14, 2015.

MENSINK, M. A.; FRIJLINK, H. W.; VAN DER VOORT MAARSCHALK, K.; HINRICHS, W. L. J. Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. **Carbohydrate Polymers**, v. 130, p. 405–419, 14 jun. 2015.

MERCALI, G. D.; TESSARO, I. C.; NOREÑA, C. P. Z.; MARCZAK, L. D. F. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 11, p. 2281–2289, 1 nov. 2010.

MESSAOUDI, S.; MANAI, M.; KERGOURLAY, G.; PRÉVOST, H.; CONNIL, N.; CHOBERT, J. M.; DOUSSET, X. *Lactobacillus salivarius*: Bacteriocin and probiotic activityFood Microbiology. **Food Microbiology**. v. 36, n. 2, p. 296-304, 2013.

MESTRES, C.; MUNANGA, B. J. C.; GRABULOS, J.; LOISEAU, G. Modeling mixed fermentation of gowé using selected *Lactobacillus plantarum* and *Pichia kluyveri* strains. **Food Microbiology**, v. 84, n. 103242, p. 103242, dez. 2019.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

MIS SOLVAL, K.; CHOULJENKO, A.; CHOTIKO, A.; SATHIVEL, S. Growth kinetics and lactic acid production of *Lactobacillus plantarum* NRRL B-4496, *L. acidophilus*

NRRL B-4495, and *L. reuteri* B-14171 in media containing egg white hydrolysates. **Lwt-Food Science and Technology**, v. 105, December 2018, p. 393–399, 2019.

MOLINA FILHO, L.; FRASCARELI, E. C.; MAURO, M. A. Effect of an edible pectin coating and blanching pretreatments on the air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 9, n. 5, p. 859–871, 1 maio 2016.

MONTEIRO, S. S.; BESERRA, Y. A. S.; OLIVEIRA, H. M. L.; PASQUALI, M. A. de B. Production of probiotic passion fruit (*Passiflora edulis* Sims f. *Flavicarpa* Deg.) drink using *Lactobacillus reuteri* and microencapsulation via spray drying. **Foods**, v. 9, n. 3, 2020.

MORAIS, M. F.; SANTOS, J. R. O.; SANTOS, M. P.; SANTOS, D. C.; COSTA, T. N.; LIMA, J. B. Modeling and thermodynamic properties of ‘bacaba’ pulp drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 702-708, set. 2019.

MOREIRA, I. Dos S.; SILVA, W. P. da; CASTRO, D. S. DE; SILVA, L. M. de M.; GOMES, J. P.; SILVA, C. D. M. P S. Production of kiwi snack slice with different thickness: Drying kinetics, sensory and physicochemical analysis. **AJCS - Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 05, p. 1835-2707, 2018.

MOREIRA, M. R.; CASSANI, L.; MARTÍN-BELLOSO, O.; SOLIVA-FORTUNY, R. Effects of polysaccharide-based edible coatings enriched with dietary fiber on quality attributes of fresh-cut apples. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 12, p. 7795-7805, 1 dez. 2015.

MU, Q.; TAVELLA, V. J.; LUO, X. M. Role of *Lactobacillus reuteri* in human health and diseases. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. APR, p. 757, 19 abr. 2018.

MUNANGA, B. DE J. C.; LOISEAU, G.; GRABULOS, J.; MESTRES, C. Modeling lactic fermentation of gowé using *Lactobacillus* starter culture. **Microorganisms**, v. 4, n. 4, p. 44, 2016.

MURILLO-MARTÍNEZ, M. M.; PEDROZA-ISLAS, R.; LOBATO-CALLEROS, C.; MARTÍNEZ-FEREZ, A.; VERNON-CARTER, E. J. Designing W1/O/W2 double emulsions stabilized by protein-polysaccharide complexes for producing edible films:

Rheological, mechanical and water vapour properties. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 4, p. 577–585, 1 jun. 2011.

MUSTAFA, S. M.; CHUA, L. S.; EL-ENSHASY, H. A.; ABD MAJID, F. A.; HANAPI, S. Z. Kinetic profile and anti-diabetic potential of fermented *Punica granatum* juice using *Lactobacillus casei*. **Process Biochemistry**, v. 14, p. 254-263, Jan, 2020.

MUZZARELLI, R. A. A.; BOUDRANT, J.; MEYER, D.; MANNO, N.; DEMARCHIS, M.; PAOLETTI, M. G. Current views on fungal chitin/chitosan, human chitinases, food preservation, glucans, pectins and inulin: A tribute to Henri Braconnot, precursor of the carbohydrate polymers science, on the chitin bicentennial. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, n. 2, p. 995–1012, 15 jan. 2012.

NADI, F.; TZEMPELIKOS, D. Vacuum drying of apples (cv. *Golden delicious*): drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 54, n. 7, p. 1853–1866, 1 jul. 2018.

OHLSSON, J. A.; JOHANSSON, M.; HANSSON, H.; ABRAHAMSON, A.; BYBERG, L.; SMEDMAN, A.; LINDMARK-MÅNSSON, H.; LUNDH, Å. Lactose, glucose and galactose content in milk, fermented milk and lactose-free milk products. **International Dairy Journal**, 2017.

OLIVEIRA, M. M. G. de; SILVA, K. de S. Effect of protein and polysaccharide-based edible coatings on quality of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during drying. **International Journal of Food Engineering**, v. 13, n. 12, 20 dez. 2017.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; VALENTE, D. S. M.; BOTELHO, F. M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 3, p. 546–554, 1 mar. 2010.

OMOLOLA, A. O.; JIDEANI, A. I. O.; KAPILA, P. F. Quality properties of fruits as affected by drying operation. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 1, p. 95–108, 2 jan. 2017.

PAES, J.; CUNHA, C. R. DA; VIOTTO, L. A. Concentration of lycopene in the pulp of papaya (*Carica papaya* L.) by ultrafiltration on a pilot scale. **Food and Bioproducts Processing**, v. 96, p. 296–305, 1 out. 2015.

PANDEY, A. K.; KUMAR, S.; RAVI, N.; CHAUHAN, O. P.; PATKI, P. E. Use of partial drying and freezing pre-treatments for development of vacuum fried papaya (*Carica papaya* L.) chips. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 6, p. 2310–2320, 28 jun. 2020.

PASHAZADEH, H.; ZANNOU, O.; KOCA, I. Modeling of drying and rehydration kinetics of *Rosa pimpinellifolia* fruits: Toward formulation and optimization of a new tea with high antioxidant properties. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 10, 20 out. 2020.

PEARL, R.; REED, L. J. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and Its Mathematical Representation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 6, n. 6, p. 275-288, 1 jun. 1920.

PEREIRA, J. C. A.; SILVA, W. P. da; GOMES, J. P.; QUEIROZ, A. J. de M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de; MELO, B. A. de; SANTIAGO, Â. M.; LIMA, A. G. B. de; MACEDO, A. D. B. Continuous and intermittent drying of rough rice: Effects on process effective time and effective mass diffusivity. **Agriculture**, v. 10, n. 7, p. 282, 9 jul. 2020.

PEREIRA, J. O.; SOARES, J.; MONTEIRO, M. J. P.; AMARO, A.; GOMES, A.; PINTADO, M. Cereal bars functionalized through: *Bifidobacterium animalis* subsp. Lactis BB-12 and inulin incorporated in edible coatings of whey protein isolate or alginate. **Food and Function**, v. 10, n. 10, p. 6892-6902, 2019.

PIMENTEL, T. C. Probióticos e benefícios à saúde. **Saúde e Pesquisa**, v. 4, n. 1, 2011.

PRANOTO, Y.; SALOKHE, V. M.; RAKSHIT, S. K. Physical and antibacterial properties of alginate-based edible film incorporated with garlic oil. **Food Research International**, v. 38, n. 3, p. 267–272, 1 abr. 2005.

PRISCO, A. DE; MAURIELLO, G. Probiotication of foods: A focus on microencapsulation tool. **Trends in Food Science and Technology**, v. 48, p. 27–39, 1 fev. 2016.

QUIRIJNS, E. J. **Modelling and dynamic optimisation of quality indicator profiles during drying**. Tese (Doutorado) - Universidade de Wageningen, Wageningen, Holanda, p. 254, 2006.

QUIRÓS-SAUCEDA, A. E.; AYALA-ZAVALA, J. F.; OLIVAS, G. I.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Edible coatings as encapsulating matrices for bioactive compounds: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 1674–1685, 10 jan. 2014.

RAIZEL, R.; SANTINI, E.; KOPPER, A. M.; REIS FILHO, A. D. Efeitos do consumo de probióticos, prebióticos e simbióticos para o organismo humano. Effects of probiotics, prebiotics and synbiotics consumption on the human organism. **Revista Ciência e Saúde**, v. 4, n. 2, p. 66–74, 2011.

RAJKUMAR, H.; KUMAR, M.; DAS, N.; KUMAR, S. N.; CHALLA, H. R.; NAGPAL, R. Effect of probiotic *Lactobacillus salivarius* ubl s22 and prebiotic fructo-oligosaccharide on serum lipids, inflammatory markers, insulin sensitivity, and gut bacteria in healthy young volunteers. **Journal of Cardiovascular Pharmacology and Therapeutics**, v. 20, n. 3, p. 289–298, 20 maio 2015.

RASCÓN, M. P.; HUERTA-VERA, K.; PASCUAL-PINEDA, L. A.; CONTRERAS-OLIVA, A.; FLORES-ANDRADE, E.; CASTILLO-MORALES, M.; BONILLA, E.; GONZÁLEZ-MORALES, I. Osmotic dehydration assisted impregnation of *Lactobacillus rhamnosus* in banana and effect of water activity on the storage stability of probiotic in the freeze-dried product. **Lwt - Food Science and Technology**, v. 92, n. February, p. 490–496, 2018.

RASHID, M. T.; MA, H.; JATOI, M. A.; SAFDAR, B.; EL-MESERY, H. S.; SARPONG, F.; ALI, Z.; WALI, A. Multi-frequency ultrasound and sequential infrared drying on drying kinetics, thermodynamic properties, and quality assessment of sweet potatoes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 5, 14 ago. 2019.

RATKOWSKY, D. A.; OLLEY, J.; MCMEEKIN, T. A.; BALL, A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. **Journal of Bacteriology**, v. 149, n. 1, p. 1–5, 1 jan. 1982.

RAVICHANDRAN, K.; PALANIRAJ, R.; SAW, N. M. M. T.; GABR, A. M. M.; AHMED, A. R.; KNORR, D.; SMETANSKA, I. Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of betalains extract. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 2216–2221, 12 maio 2014.

REN, H.; ZENTEK, J.; VAHJEN, W. Optimization of production parameters for probiotic *Lactobacillus* strains as feed additive. **Molecules**, v. 24, n. 18, p. 3286, 9 set. 2019.

RODRIGUES, S.; SILVA, L. C. A.; MULET, A.; CÁRCEL, J. A.; FERNANDES, F. A. N. Development of dried probiotic apple cubes incorporated with *Lactobacillus casei* NRRL B-442. **Journal of Functional Foods**, v. 41, n. December 2017, p. 48–54, 2018.

ROGOSA, M.; WISEMAN, R. F.; MITCHELL, J. A.; DISRAELY, M. N.; BEAMAN, A. J. Species differentiation of oral lactobacilli from man including description of *Lactobacillus salivarius* nov spec and *Lactobacillus Cellobiosus* nov spec. **Journal of Bacteriology**, v. 65, n. 6, p. 681–699, jun. 1953.

ROJAS-GRAÜ, M. A.; SOLIVA-FORTUNY, R.; MARTÍN-BELLOSO, O. **Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: a review** **Trends in Food Science and Technology**. Elsevier, 1 out. 2009. Acesso em: 3 set. 2020

ROKKA, S.; RANTAMÄKI, P. Protecting probiotic bacteria by microencapsulation: challenges for industrial applications. **European Food Research and Technology**, v. 231, n. 1, p. 1–12, 9 maio 2010.

ROSS, T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology. **Journal of Applied Bacteriology**, 1996.

SAAD, N.; DELATTRE, C.; URDACI, M.; SCHMITTER, J. M.; BRESSOLLIER, P. An overview of the last advances in probiotic and prebiotic field. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 1–16, 1 jan. 2013.

SALMINEN, S.; OUWEHAND, A.; BENNO, Y.; LEE, Y. K. Probiotics: How should they be defined? **Trends in Food Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 107–110, 1 mar. 1999.

SALVADOR, A.; SANZ, T.; FISZMAN, S. M. Changes in colour and texture and their relationship with eating quality during storage of two different dessert bananas. **Postharvest Biology and Technology**, v. 43, n. 3, p. 319–325, mar. 2007.

SAMPAIO, R. M.; NETO, J. P. M.; PEREZ, V. H.; MARCOS, S. K.; BOIZAN, M. A.; SILVA, L. R. Mathematical modeling of drying kinetics of persimmon fruits (*Diospyros kaki* cv. Fuyu). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 1, p. e12789, 1 fev. 2017.

SÁNCHEZ-ORTEGA, I.; GARCÍA-ALMENDÁREZ, B. E.; SANTOS-LÓPEZ, E. M.; AMARO-REYES, A.; BARBOZA-CORONA, J. E.; REGALADO, C. Edible films and antimicrobial coatings for the conservation of meat and meat products. **The Scientific World Journal**, v. 1, 2014.

SANTOS, N. C.; SILVA, W. P. da; BARROS, S. L.; ARAÚJO, A. J. B.; GOMES, J. P.; ALMEIDA, R. L. J.; NASCIMENTO, A. P. S.; ALMEIDA, R. D.; SILVA, C. M. D. P. S.; QUEIROZ, A. J. de M.; FIGUEIREDO, R. M. F. de. Study on drying of black rice (*Oryza sativa* L.) grains: physical-chemical and bioactive quality. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 9, p. 203-212, 30 jun. 2019a.

SANTOS, N. C.; BARROS, S. L.; SILVA, S. N.; RIBEIRO, V. H. A.; MELO, M. O. P.; SILVA, W. P.; ALMEIDA, R. L. J.; PEREIRA, T. S.; ARAUJO, A. J. B.; GOMES, J. P.; NASCIMENTO, A. P. S.; SILVA, V. M. A.; VIEIRA, D. M. Physico-chemical characterization and kinetics of drying of organic yellow bell pepper (*Capsicum annuum* L.). **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 29, p. 1247–1253, 18 jul. 2019b.

SANTOS, N. C.; BARROS, S. L.; MONTEIRO, S. S.; SILVA, S. N.; RIBEIRO, V. H. A.; SILVA, V. M. A.; GOMES, J. P.; SANTIAGO, Â. M.; LUIZ, M. R.; VIEIRA, D. M.; ARAÚJO, R. D. A.; VILAR, S. B. O.; BARROS, E. R. Kinetics of drying and physical-chemical quality of peach cv. Hubimel. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 16, p. 223, 30 set. 2019.

SANTOS, N. C.; SILVA, W. P.; BARROS, S. L.; ALMEIDA, R. L. J.; BRITO ARAÚJO, A. J.; SILVA NASCIMENTO, A. P. Red rice (*Oryza sativa* L.) use in flour production:

Convective drying and bioactive quality. **Journal of Food Process Engineering**, p. 1–10, 15 jul. 2020.

SANTOS, N. C.; ALMEIDA, R. L. J.; SILVA, G. M.; MONTEIRO, S. S.; ANDRÉ, A. M. M. C. N. Effect of ultrasound pre-treatment on the kinetics and thermodynamic properties of guava slices drying process. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 66, p. 102507, dez. 2020a.

SARPONG, F.; JIANG, H.; OTENG-DARKO, P.; ZHOU, C.; AMENORFE, L. P.; MUSTAPHA, A. T.; RASHID, M. T. Mitigating effect of relative humidity (RH) on 2-furoylmethyl-Amino acid formation. **LWT-Food Science and Technology**, v. 101, p. 551–558, 1 mar. 2019.

SAYAN, H.; ASSAVACHEEP, P.; ANGKANAPORN, K.; ASSAVACHEEP, A. Effect of *Lactobacillus salivarius* on growth performance, diarrhea incidence, fecal bacterial population and intestinal morphology of suckling pigs challenged with F4+ enterotoxigenic *Escherichia coli*. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 31, n. 8, p. 1308–1314, 1 ago. 2018.

SCHWEIGGERT, R. M.; STEINGASS, C. B.; MORA, E.; ESQUIVEL, P.; CARLE, R. Carotenogenesis and physico-chemical characteristics during maturation of red fleshed papaya fruit (*Carica papaya* L.). **Food Research International**, v. 44, n. 5, p. 1373–1380, 1 jun. 2011a.

SCHWEIGGERT, R. M.; STEINGASS, C. B.; HELLER, A.; ESQUIVEL, P.; CARLE, R. Characterization of chromoplasts and carotenoids of red- and yellow-fleshed papaya (*Carica papaya* L.). **Planta**, v. 234, n. 5, p. 1031–1044, 26 nov. 2011b.

SEERANGURAYAR, T.; AL-ISMAILI, A. M.; JANITHA JEEWANTHA, L. H.; AL-HABSI, N. A. Effect of solar drying methods on color kinetics and texture of dates. **Food and Bioproducts Processing**, v. 116, p. 227–239, jul. 2019.

SHARAFI, H.; ALIDOST, L.; LABABPOUR, A.; SHAHBANI ZAHIRI, H.; ABBASI, H.; VALI, H.; AKBARI NOGHABI, K. Antibacterial activity of probiotic *lactobacillus plantarum* hk01: Effect of divalent metal cations and food additives on production efficiency of antibacterial compounds. **Probiotics and Antimicrobial Proteins**, v. 5, n. 2, p. 121–130, 20 jun. 2013.

SHI, X.; YANG, Y.; LI, Z.; WANG, X.; LIU, Y. Moisture transfer and microstructure change of banana slices during contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 66, p. 102537, dez. 2020.

SHIGEMATSU, E.; DORTA, C.; RODRIGUES, F. J.; CEDRAN, M. F.; GIANNONI, J. A.; OSHIWA, M.; MAURO, M. A. Edible coating with probiotic as a quality factor for minimally processed carrots. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 9, p. 3712–3720, 1 set. 2018.

SHOAIB, M.; SHEHZAD, A.; OMAR, M.; RAKHA, A.; RAZA, H.; SHARIF, H. R.; SHAKEEL, A.; ANSARI, A.; NIAZI, S. Inulin: Properties, health benefits and food applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 147, p. 444–454, 20 ago. 2016.

SILVA, G. D. da; MEIRELES, Z.; BARROS, P.; MEDEIROS, R. A. B. de; CARVALHO, C. B. O. DE; RUPERT, S. C.; AZOUBEL, P. M. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT - Food Science and Technology**, v. 74, p. 114–119, 2016.

SILVA, M. A. da; BIERHALZ, A. C. K.; KIECKBUSCH, T. G. Alginate and pectin composite films crosslinked with Ca²⁺ ions: Effect of the plasticizer concentration. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, n. 4, p. 736–742, 19 jul. 2009.

SILVA, W. P. de; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. da S. e; GOMES, J. P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 3, p. 302–308, jun. 2010.

SILVA, W. P. de; SILVA, C. M. D. P. da S. e; SOUSA, J. A. R.; FARIAS, V. S. O. Empirical and diffusion models to describe water transport into chickpea (*Cicer arietinum* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 48, n. 2, p. 267–273, 1 fev. 2013.

SILVA, W. P. da; MEDEIROS, M. S.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. da S. e Improvement of methodology for determining local thermal diffusivity and heating time of green coconut pulp during its pasteurization. **Journal of Food Engineering**, v. 285, p. 110104, nov. 2020.

SILVA JÚNIOR, E. V.; MELO, L. de M.; MEDEIROS, R. A. B.; BARROS, Z. M. P.; AZOUBEL, P. M. Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT-Food Science and Technology**, v. 97, p. 317–322, 1 nov. 2018.

SILVA, K. S.; GARCIA, C. C.; AMADO, L. R.; MAURO, M. A. Effects of edible coatings on convective drying and characteristics of the dried pineapple. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, n. 7, p. 1465–1475, 4 jul. 2015.

SILVA NETO, O. P.; PINTO, E. V. da S.; OOTANI, M. A.; SILVA JUNIOR, J. L.; BENTES LIMA, J. L. da S.; SOUSA, A. E. D. de. Ozone slows down anthracnose and increases shelf life of papaya fruits. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 41, n. 5, 2019.

SILVA, S. D. N.; SANTOS, N. C.; ALMEIDA, R. L. J.; BARROS, S. L.; SILVA, V. M. A.; GOMES, J. P. Análise do perfil de textura do *Physalis angulata* L desidratado osmoticamente. **Caderno Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 7, p. 6831, 8 jan. 2020a.

SILVA, W. P. da; SILVA, C. M. D. P. da S. e. **Prescrito - Adsorção e dessorção**, 2009a. Disponível em: <<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm>>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Convective Adsorption - Desorption**, 2009b.

SMITH, S.; SCHAFFNER, D. W. Evaluation of a *Clostridium perfringens* predictive model, developed under isothermal conditions in broth, to predict growth in ground beef during cooling. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 5, p. 2728–2733, 1 maio 2004.

SOUKOULIS, C.; YONEKURA, L.; GAN, H. H.; BEHBOUDI-JOBBEHDAR, S.; PARMENTER, C.; FISK, I. Probiotic edible films as a new strategy for developing functional bakery products: The case of pan bread. **Food Hydrocolloids**, v. 39, p. 231–242, 1 ago. 2014.

SOUKOULIS, C.; BEHBOUDI-JOBBEHDAR, S.; MACNAUGHTAN, W.; PARMENTER, C.; FISK, I. D. Stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG incorporated in edible films: Impact of anionic biopolymers and whey protein concentrate. **Food Hydrocolloids**, v. 70, p. 345–355, 2017.

SPERANZA, B.; CAMPANIELLO, D.; BEVILACQUA, A.; ALTIERI, C.; SINIGAGLIA, M.; CORBO, M. R. Viability of *Lactobacillus plantarum* on fresh-cut chitosan and alginate-coated apple and melon pieces. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. OCT, p. 1-8, 23 out. 2018.

STATSOFT - (Data Analysis Software System), Version 7.0. 2005.

STAVROPOULOU, E.; BEZIRTZOGLU, E. Predictive modeling of microbial behavior in food. **Foods**, v. 8, n. 12, p. 654, 6 dez. 2019.

STUMBO, C.; PROKIT, K. S.; RAMAKRISHNAN, T. V.; EVANS, D. A. **CRC handbook of lethality guides for low acid canned foods**. Boca Raton (FL). CRC Press: v. 1, 1983.

SWADA, J. G.; CORCUERA, J. I. R. de; ENGESETH, N. J. Impact of alternative thermal and non-thermal processing on the enzymatic activity of papaya and strawberry nectars and their blends. **Journal of Food Engineering and Technology**, v. 9, n. 1, p. 1–14, 15 jun. 2020.

TAOUKIS, P. S.; KOUTSOUMANIS, K.; NYCHAS, G. J. E. Use of time-temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions. **International Journal of Food Microbiology**, v. 53, n. 1, p. 21-31, 1999.

TAPIA, M. S.; ROJAS-GRAÜ, M. A.; RODRÍGUEZ, F. J.; RAMÍREZ, J.; CARMONA, A.; MARTIN-BELLOSO, O. Alginate- and gellan-based edible films for probiotic coatings on fresh-cut fruits. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 4, p. E190–E196, 1 maio 2007.

TARLAK, F.; OZDEMIR, M.; MELIKOGLU, M. Predictive modelling for the growth kinetics of *Pseudomonas* spp. on button mushroom (*Agaricus bisporus*) under isothermal and non-isothermal conditions. **Food Research International**, v. 130, n. 108912, p. 108912, abr. 2020.

TAYLOR, J. R. **An introduction to error analysis**. 2nd. ed. Sausalito, California: University Science books, 1997.

THAKUR, R.; PRISTIJONO, P.; GOLDING, J. B.; STATHOPOULOS, C. E.; SCARLETT, C. J.; BOWYER, M.; SINGH, S. P.; VUONG, Q. V. Development and application of rice starch based edible coating to improve the postharvest storage potential and quality of plum fruit (*Prunus salicina*). **Scientia Horticulturae**, v. 237, n. December 2017, p. 59–66, 2018.

TODISCO, K. M.; JANZANTTI, N. S.; SANTOS, A. B.; GALLI, F. S.; MAURO, M. A. Effects of temperature and pectin edible coatings with guava by-products on the drying kinetics and quality of dried red guava. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 12, p. 4735–4746, 1 dez. 2018.

TREYBAL, R. E. **Mass transfer operations**. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1980.

UDOMKUN, P.; NAGLE, M.; MAHAYOTHEE, B.; NOHR, D.; KOZA, A.; MÜLLER, J. Influence of air drying properties on non-enzymatic browning, major bio-active compounds and antioxidant capacity of osmotically pretreated papaya. **LWT - Food Science and Technology**, v. 60, n. 2, p. 914–922, 1 mar. 2015.

UMARAW, P.; MUNEKATA, P. E. S.; VERMA, A. K.; BARBA, F. J.; SINGH, V. P.; KUMAR, P.; LORENZO, J. M. Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 98, p. 10–24, abr. 2020.

VAN BOEKEL. Statistical aspects of kinetic modeling for food science problems. **Journal of Food Science**. v. 61, n. 3, p. 477–486, 1996.

VEGA-GÁLVEZ, A.; ZURA-BRAVO, L.; LEMUS-MONDACA, R.; MARTINEZ-MONZÓ, J.; QUISPE-FUENTES, I.; PUENTE, L.; DI SCALA, K. Influence of drying temperature on dietary fibre, rehydration properties, texture and microstructure of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 4, p. 2304–2311, 28 abr. 2015.

VEGA-GÁLVEZ, A.; POBLETE, J.; QUISPE-FUENTES, I.; URIBE, E.; BILBAO-SAINZ, C.; PASTÉN, A. Chemical and bioactive characterization of papaya (*Vasconcellea pubescens*) under different drying technologies: evaluation of antioxidant and antidiabetic potential. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 13, n. 3, p. 1980–1990, 27 set. 2019.

VEGA-GÁLVEZ, A.; STUCKEN, K.; CANTUARIAS, C.; LAMAS, F.; GARCÍA, V.; PASTÉN, A. Antimicrobial properties of papaya (*Vasconcellea pubescens*) subjected to low-temperature vacuum dehydration. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, p. 102563, nov. 2020.

VILAPLANA, R.; CHICAIZA, G.; VACA, C.; VALENCIA-CHAMORRO, S. Combination of hot water treatment and chitosan coating to control anthracnose in papaya (*Carica papaya* L.) during the postharvest period. **Crop Protection**, v. 128, p. 105007, 1 fev. 2020.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, v. 11, n. 6, p. 668–672, 1978.

WANG, D.; ZHANG, M.; WANG, Y.; MARTYNENKO, A. Effect of Pulsed-Spouted Bed Microwave Freeze Drying on Quality of Apple Cuboids. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 5, p. 941–952, 30 maio 2018.

WANG, J.; CHEN, J.; HU, Y.; HU, H.; LIU, G.; YAN, R. Application of a predictive growth model of *Pseudomonas* spp. for estimating shelf life of fresh *agaricus bisporus*. **Journal of Food Protection**, v. 80, n. 10, p. 1676-1681, 2017.

WANG, W.; CHEN, G.; MUJUMDAR, A. S. Physical interpretation of solids drying: an overview on mathematical modeling research. **Drying Technology**, v. 25, n. 4, p. 659–668, 19 abr. 2007.

WATERHOUSE, A. Folin-ciocalteau micro method for total phenol in wine. **American journal of Enology and Viticulture**. v. 48, p. 357-363, 2006.

WEIBULL, W. Wide applicability. **Journal of applied mechanics**, 1951.

WHITING, R. C. Microbial modeling in foods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 35, n. 6, p. 467–494, nov. 1995.

WIJAYA, C. H.; FENG, C. Flavour Of Papaya (*Carica papaya* L.) Fruit. **Biotropia**, v. 20, n. 1, p. 50–71, 23 set. 2013.

YAN, Z.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 84, n. 3, p. 430–440, fev. 2008.

YI, J.Y.; LYU, J.; BI, J. F.; ZHOU, L. Y.; ZHOU, M. Hot air drying and freeze drying pre-treatments coupled to explosion puffing drying in terms of quality attributes of mango, pitaya, and papaya fruit chips. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 6, p. e13300, dez. 2017.

YU, F.; LI, Y.; WU, Z.; WANG, X.; WAN, N.; YANG, M. Dehydration of wolfberry fruit using pulsed vacuum drying combined with carboxymethyl cellulose coating pretreatment. **LWT-Food Science and Technology**, v. 134, p. 110159, dez. 2020.





ZERPA-CATANHO, D.; ESQUIVEL, P.; MORA-NEWCOMER, E.; SÁENZ, M. V.; HERRERA, R.; JIMÉNEZ, V. M. Transcription analysis of softening-related genes during postharvest of papaya fruit (*Carica papaya* L. ‘Pococi’ hybrid). **Postharvest Biology and Technology**, v. 125, p. 42–51, 1 mar. 2017.

ZURA-BRAVO, L.; RODRIGUEZ, A.; STUCKEN, K.; VEGA-GÁLVEZ, A. Drying kinetics of probiotic-impregnated murta (*Ugni molinae* T.) berries. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 1, p. 103–113, 2019.

ZWIETERING, M. H.; JONGENBURGER, I.; ROMBOUTS, F. M.; VAN'T RIET, K. Modeling of the bacterial growth curve. **Applied and Environmental Microbiology**, 1990.

Article

Optimization of the Effects of Different Temperatures and Compositions of Filmogenic Solution on *Lactobacillus salivarius* Using Predictive Mathematical Models

Shênia Santos Monteiro ¹ , Wilton Pereira da Silva ^{1,*} , Shirley Santos Monteiro ¹, Josivanda Palmeira Gomes ¹, Emmanuel Moreira Pereira ², Alexandre José de Melo Queiroz ¹, Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo ¹ , Ana Paula Trindade Rocha ¹, Hanndson Araujo Silva ¹ , Leyllanne Renalle Batista de Almeida ¹, Mábía Ruana Silva de Sena ¹ and Antônio Gilson Barbosa de Lima ¹

¹ Department of Agricultural Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58428-830, Brazil; shenia-monteiro@hotmail.com (S.S.M.); shirley_pinto_monteiro@hotmail.com (S.S.M.); josivanda@gmail.com (J.P.G.); alexandrejm@gmail.com (A.J.d.M.Q.); rossanamff@gmail.com (R.M.F.d.F.); ana_trindade@yahoo.com.br (A.P.T.R.); hanndson@gmail.com (H.A.S.); leyllaalmeida@gmail.com (L.R.B.d.A.); mabia_ruana@hotmail.com (M.R.S.d.S.); antonio.gilson@ufcg.edu.br (A.G.B.d.L.)

² Department of Agriculture, Federal University of Paraiba, Bananeiras 58220-000, Brazil; emmanuel16mop@hotmail.com

* Correspondence: wiltonps@uol.com.br; Tel.: +55-83-996927630



Citation: Monteiro, S.S.; da Silva, W.P.; Monteiro, S.S.; Gomes, J.P.; Pereira, E.M.; de Melo Queiroz, A.J.; de Figueirêdo, R.M.F.; Rocha, A.P.T.; Silva, H.A.; de Almeida, L.R.B.; et al. Optimization of the Effects of Different Temperatures and Compositions of Filmogenic Solution on *Lactobacillus salivarius* Using Predictive Mathematical Models. *Foods* **2021**, *10*, 25. <https://doi.org/10.3390/foods10010025>

Received: 18 November 2020

Accepted: 19 December 2020

Published: 23 December 2020

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: It is well known that intake of probiotic brings health benefits. Lactic bacteria with probiotic potential have aroused the interest of the industry in developing food products that incorporate such benefits. However, incorporating probiotic bacteria into food is a challenge for the industry, given the sensitivity of probiotic cultures to process conditions. Therefore, the objective of this study is to evaluate gelatin- and inulin-based filmogenic solutions as a potential vehicle for incorporating probiotics into food products and to model the fermentation kinetics. *L. salivarius* (*Lactobacillus salivarius*) growth in filmogenic solutions was analyzed under the influence of a variety of gelatin concentrations (1.0–3.0%) and inulin concentrations (4.0–6.0%) and fermented under the effect of different temperatures (25–45 °C). A full 2³ factorial plan with three replicates at the central point was used to optimize the process. The impacts of process conditions on cell development are fundamental to optimize the process and make it applicable by the industry. The present study showed that the optimal conditions for the development of probiotic cells in filmogenic solutions are a combination of 1.0% gelatin with 4.0% inulin and fermentation temperature of 45 °C. It was observed that the maximum cell growth occurred in an estimated time of about 4 h of fermentation. *L. salivarius* cell production and substrate consumption during the fermentation of the filmogenic solution were well simulated by a model proposed in this article, with coefficients of determination of 0.981 (cell growth) and 0.991 (substrate consumption).

Keywords: fermentation; inulin; predictive modelling; probiotic

1. Introduction

Lactobacillus spp. is one of the most widely used probiotics in the lactic acid bacteria group and can be found in a wide variety of food products worldwide. This genus plays a very important role in food fermentation and can also be found in the gastrointestinal system of humans and other animals, in varying amounts, depending on the species, age of the host or location within the intestine [1]. In recent years, *Lactobacillus salivarius* has gained attention from researchers as a promising probiotic species. Probiotic properties, such as the ability to modulate the microbiota, produce antimicrobial substances, stimulate the protective immune response, inhibit fecal enzymatic activity and produce

short-chain fatty acids, allowing a convenient acidification of the intestine, have been attributed to *L. salivarius* [2].

Due to the sensitivity of probiotics to common processing conditions such as heat treatment, low pH environments, high osmotic pressure and high redox potential, the design of effective physicochemical barriers to stabilize organisms is essential for their complete commercial exploitation in a wide variety of foods [3].

The products commonly found on the market as vehicles for probiotics are fermented milks and dairy products. However, fruits and vegetables have been studied as an alternative to the consumption of milk products. To ensure the maximum viability of probiotic cells in products of plant origin, drying techniques such as spray drying and freeze drying are the most applied for the manufacture of new products. As an alternative to increase the variety of probiotic products, the application of edible film added with probiotic cultures has been studied, and a large number of applications have already been investigated [3]. These investigations include bakery products [4], meat and fishing products [5], in addition to fruits [6] and cereal bars [7]. Although the results obtained are promising for application in food, the effect of process conditions, such as temperature, which influences process time, requires further research.

The prospects for using edible films as potential carriers of active ingredients are high. Edible films have the potential to stabilize food structures in multiple scale lengths, while creating bespoke structures (enhanced mechanical properties, extended shelf life, maintaining structural integrity), and can be used to provide nutritional improvements through the inclusion of probiotics [3].

Edible films used in food have different properties depending on the structural material. The optimization of the composition of edible films is one of the most important stages of research in this field, as they must be formulated according to the properties of the fruits and vegetables to which they must be applied [8], as well as the material of interest that one seeks to preserve, such as probiotic cells.

Predictive models of microbial interaction can help clarify how specific conditions that prevail in the food environment influence the effectiveness of the growth of lactic acid bacteria and/or their production of metabolites [9]. According to Whiting [10], predictive models describe the growth of microorganisms quickly, efficiently and economically, compared to traditional enumeration methods, which are costly and time-consuming. Mathematical models used in predictive microbiology are categorized mainly as primary, secondary and tertiary models. Primary models are mathematical equations that define growth data as a function of time under a constant environmental condition. The Baranyi model [11] is the most widely used primary model to describe microbial growth data. Secondary models use parameters determined by the primary models to predict changes in microbial structure and specific maximum growth rate as a function of environmental factors such as temperature, oxygen, pH and water activity. The maximum specific growth rate, which is one of the most critical kinetic growth parameters, can be modeled using the secondary models. Temperature plays the fundamental role of affecting the growth behavior of microorganisms in food. The Ratkowsky model [12] and Arrhenius model [13] are examples of secondary models often used to determine temperature dependence in microbial growth. Tertiary models are formed by the combination of primary and secondary models and use a computer as an estimation tool, but these models suffer from the lack of experimental information in relation to many specific foods [14].

Several mathematical models have been used in the literature to describe experimental growth data over time. As an example, Germec et al. [15] modeled lactic acid fermentation in a bioreactor with carob extract. To determine the modeling success, root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), determination coefficient (R^2), bias factor (BF) and accuracy factor (AF) were used. Ilgin et al. [16] studied inulinase production and mathematical modeling from carob extract by using *Aspergillus niger*. In order to define the best models (Baranyi and Cone model), the authors used the following statistical indicators: RMSE, MAE, BF and AF. Silva et al. [17], when modeling the growth of *Lactobacillus viri-*

descens under non-isothermal conditions in sliced and vacuum-packed ham, compared the values predicted by the Baranyi model with the experimental values using the following statistical indicators: RMSE, BF and AF. Tarlak et al. [14], when fitting the Baranyi model to determine the kinetic growth parameters of *Pseudomonas* spp. on button mushrooms stored under isothermal and non-isothermal conditions, used RMSE and R^2 as indicators of model fit quality. In general, studies involving cell growth and substrate consumption available in the literature do not evaluate each parameter of mathematical models through Student's *t*-test, which makes it possible to determine whether a parameter can be considered equal to zero, despite having the value obtained in the fit. For this, it is necessary to know not only the value of the parameter, but also its uncertainty and the number of degrees of freedom of the fitting with which the parameter was obtained. Although the use of this test is fairly common in studies involving experimental planning, perhaps due to the large number of parameters involved in an analysis, this test is not as common in the fitting of more compact functions to an experimental dataset. However, this test makes it possible to evaluate, in any of the two situations mentioned above, whether the calculated parameters have (or not) statistical significance. In addition, it is appropriate to highlight the importance of using predictive models to describe the growth of probiotic microorganisms in edible films with potential for application in foods, especially because they are considered as innovative products. In this context, the objectives of this article are defined below.

The aim of this study is to describe and evaluate the interaction of the composition of filmogenic solutions on the growth of *L. salivarius* under different temperatures and to describe the fermentation process using predictive microbial interaction models. The model for cell growth and substrate consumption were chosen, the usual statistical indicators in this field of study (R^2 , chi-square, χ^2 , BF and AF), in addition to considering the Student's *t*-test.

2. Materials and Methods

2.1. Preparation and Inoculation of *L. salivarius* in the Filmogenic Solution

The choice of gelatin and inulin for the preparation of filmogenic solutions is due to the objective of combining the functional properties of each material, seeking to obtain an efficient filmogenic solution as a gas barrier and good mechanical properties at low relative humidity [18]. Gelatin has technological properties well known in the industry, one of which is encapsulation, capable of protecting the material of interest from adverse conditions, such as exposure of the material to high temperatures. Combined with gelatin, inulin aggregates the film-forming solution with gelling properties depending on the concentration, among other factors, in addition, inulin is a functional additive relevant to the food industry due to its prebiotic properties, promoting the growth of probiotic bacteria such as *L. salivarius*.

The concentrations of gelatin (1.0, 2.0 and 3.0%) and inulin (4.0, 5.0 and 6.0%) in the preparation of filmogenic solutions, as well as the effects of fermentation temperature (25.0, 35.0 and 45.0 °C) were studied through a full 2^3 factorial plan with 3 replicates at the central point. The specifications of the conditions for each of the 11 experiments were defined in Table 1.

Effects of independent variables on the physicochemical and biological characteristics of *L. salivarius* were analyzed using the response surface methodology, which assumes that there is a polynomial function that relates each response of interest to the independent variables. The statistical test of analysis of variance (ANOVA) was performed with a 95% confidence level, including the statistical significance of each term of the model to be fitted (*p*-value), the estimated effects on each term and the coefficient of determination of the model in order to establish its reliability, using Statistica 7.0 software (7.0.61.0, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) [19].

Table 1. Matrix of the full 2^3 experimental plan with three replicates at the central point with actual values of the independent variables.

Experiment	Independent Variables		
	Gelatin (%)	Inulin (%)	Temperature (°C)
1	1.0	4.0	25.0
2	3.0	4.0	25.0
3	1.0	6.0	25.0
4	3.0	6.0	25.0
5	1.0	4.0	45.0
6	3.0	4.0	45.0
7	1.0	6.0	45.0
8	3.0	6.0	45.0
9	2.0	5.0	35.0
10	2.0	5.0	35.0
11	2.0	5.0	35.0

The mixtures of gelatin and inulin were heated under shaking at 80 °C until complete solubilization of gelatin and inulin in water. The heating of the solution, in addition to increasing the solubility of gelatin and inulin, aims to inactivate possible pathogenic microorganisms. The filmogenic solution was cooled to temperatures indicated in the full factorial plan for the inoculation of in freeze-dried probiotic culture. The lyophilized probiotic strain of *L. salivarius* was inoculated in the filmogenic solutions at an initial concentration of 10 LogCFU·mL⁻¹ and shaken for 10 min to obtain homogeneity in the sample. The initial concentration of 10 LogCFU·mL⁻¹ was adopted in order to obtain a maximum concentration of probiotic cells in the filmogenic solution capable of promoting benefits to the consumer's health, when consumed through application in food. It was taken into account that, regardless of the process used in the production of food coated with the probiotic filmogenic solution, there may be a reduction in cell viability.

To study the kinetics of the fermentation process, a 165 mL volume of probiotic filmogenic solution was used in fermentation, and this volume was distributed in 11 15 mL falcon tubes. The fermentation process occurred under isothermal conditions, and for this, a BOD (Biochemical Oxygen Demand) incubator with controlled temperature was used, without shaking. The biological characteristics of *L. salivarius* in filmogenic solutions were determined by monitoring fermentation for 20 h. At each interval of 2 h, a 15 mL aliquot of the probiotic filmogenic solution was collected, and then, the cell concentration was determined by the direct counting method in Neubauer chamber. The pH was monitored by taking each measurement with a pH meter; total soluble solids were determined using a portable refractometer, and reducing sugars were determined by the calorimetric method using the 3,5-dinitrosalicylic acid, according to Miller [20]. The contents of reducing sugars in probiotic filmogenic solutions during fermentation were used to describe substrate consumption during the fermentation process with *L. salivarius*. Although the experiments related to cell growth kinetics and substrate consumption were carried out for 20 h, only the data collected in the first 14 h were analyzed, eliminating the period referring to the decline or cell death phase.

2.2. Mathematical Models: Cell Growth and Substrate Consumption

The average data of cell growth and substrate consumption obtained during the fermentation stage of the experiments were used for mathematical modeling of kinetics. The study of mathematical models was carried out to describe the process of *L. salivarius* growth and substrate consumption in the probiotic filmogenic solution that had the greatest productive advantage. In addition to Statistica software, LAB Fit Curve Fitting Software (www.labfit.net) was also used in this study of kinetics. Initially, primary models were selected from the literature to describe cell growth and substrate consumption in the probiotic filmogenic solution, as described below.

2.2.1. Baranyi Model

The Baranyi model [11], with 5 parameters, was one of the models used to estimate the kinetic parameters of *L. salivarius* growth in filmogenic solutions under isothermal conditions and to predict substrate consumption. This model is given according to Equation (1):

$$A(t) = A_0 + \mu_{\max}F(t) - \ln\left(1 + \left(\frac{\exp(\mu_{\max}F(t)) - 1}{\exp(A_m - A_0)}\right)\right) \quad (1)$$

where $A(t)$ is the concentration of cells ($\text{LogCFU}\cdot\text{mL}^{-1}$) or concentration of reducing sugars (%) at the time instant t ; A_0 is the minimum concentration of cells ($\text{LogCFU}\cdot\text{mL}^{-1}$) or minimum content of reducing sugars (%). A_m is the maximum concentration of cells ($\text{LogCFU}\cdot\text{mL}^{-1}$) or maximum content of reducing sugars (%); μ_{\max} is the maximum rate of growth or substrate consumption (h^{-1}). For the Baranyi model, the $F(t)$ function is defined by Equation (2):

$$F(t) = t + \frac{1}{v} \ln(\exp(-vt) + \exp(-h_0) - \exp(-vt - h_0)) \quad (2)$$

where t is the time, $h_0 = \mu_{\max}\lambda$, and λ is the duration of the lag phase, v is the maximum rate of limiting substrate consumption, assumed to be equal to μ_{\max} [21].

2.2.2. Gompertz Model

The Gompertz model [22], with 3 parameters, is given according to Equation (3):

$$A(t) = A_m \exp[-\exp(-\mu_{\max}(t - I))] \quad (3)$$

where I is the time (h) at which the rate of growth or substrate consumption is maximum.

2.2.3. Generalized Gompertz Model

The generalized Gompertz model [23], with 4 parameters, is given by Equation (4):

$$A(t) = A_0 + (A_m - A_0) \exp[-\exp(-\mu_{\max}(t - I))] \quad (4)$$

2.2.4. Logistic Model

The logistic model [24], with 3 parameters, is given according to Equation (5):

$$A(t) = \frac{A_m}{1 + \exp(-\mu_{\max}(t - I))} \quad (5)$$

2.2.5. Modified Logistic Model

The modified logistic model [25], with 4 parameters, is given by Equation (6):

$$A(t) = A_0 + \frac{A_m - A_0}{1 + \exp\left(\frac{4 \times \mu_{\max}(\lambda - t)}{A_m} + 2\right)} \quad (6)$$

2.2.6. Weibull Model

The Weibull model [26], with 4 parameters, is given by Equation (7):

$$A(t) = A_m - (A_m - A_0) \exp\left[-(k_1 t)^{\delta_1}\right] \quad (7)$$

where k_1 , given in h^{-1} , is the parameter that governs the rate at which the response variable approaches its maximum potential; and δ_1 is an allometric constant. This constant is a parameter that controls the ordinate t (fermentation time) for the inflection point where the Weibull model is an exponential curve, if its value is equal to 1. However, for $\delta_1 > 1$, the Weibull model is a sigmoidal curve [23].

The parameters of the functions presented, as well as the statistical indicators, were determined by nonlinear regression using the least squares method, through the Levenberg–Marquardt algorithm.

2.3. Validation of Selected Models

The fitting of the selected primary models to the experimental data of the fermentation kinetics of *L. salivarius* was evaluated considering the coefficient of determination R^2 , chi-square χ^2 and also the Student's *t*-test for each parameter determined. In addition, the values predicted by the models were compared with the experimental values through the bias factor (BF) and accuracy factor (AF) tests [27,28], which are given according to Equations (8) and (9):

$$BF = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n \log\left(\frac{\text{Predicted}}{\text{Experiment}}\right)}{n}} \quad (8)$$

$$AF = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n \left|\log\left(\frac{\text{Predicted}}{\text{Experiment}}\right)\right|}{n}} \quad (9)$$

where *n* is the total number of experimental data.

The statistical indicator bias factor (BF) is a measure of the mean variation between the experimental value and the value predicted by the model. The accuracy factor (AF) measures the mean difference between the experimental values and the predicted values, disregarding whether the difference is positive or negative. A value close to 1 for BF and AF indicates that there is an agreement between the experimental and predicted values [14].

3. Results and Discussion

3.1. Optimization of Fermentation with *L. salivarius*

Table 2 summarizes the main results related to the optimization of fermentation with *L. salivarius*.

Table 2. Biological and physicochemical characteristics of the filmogenic solutions fermented with *L. salivarius*, after 4 h of fermentation.

Parameters	Unit	Experiments										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Maximum cell concentration	LogCFU·mL ⁻¹	11.05	11.06	11.03	11.06	12.20	12.09	12.08	12.09	11.09	11.05	11.13
Maximum growth rate (μ_{\max})	h ⁻¹	0.54	0.54	0.54	0.54	0.30	0.30	0.30	0.30	0.27	0.27	0.27
Generation time	h	1.28	1.28	1.28	1.28	2.31	2.34	2.34	2.34	2.54	2.56	2.54
Cell yield ($Y_{X/S}$)	LogCFU·mL ⁻¹ g ⁻¹	7.69	4.56	9.17	4.36	15.59	6.20	15.56	7.11	13.48	14.45	11.38
pH		5.63	5.47	5.53	5.47	5.40	5.53	5.43	5.43	5.77	5.90	5.80
Total soluble solids	°Brix	6.00	7.97	7.20	9.43	5.60	7.40	7.20	9.00	7.00	7.00	7.40
Reducing sugars	%	1.27	1.10	1.71	1.41	1.22	1.06	1.59	1.41	1.39	1.42	1.41

The growth of probiotic microorganisms such as *L. salivarius* in filmogenic solutions opens up possibilities for applications in a variety of food products. As examples, fresh fruits, minimally processed and/or dehydrated, as well as bakery products and fish can be mentioned. In these products, probiotic microorganisms add not only functional characteristics, but also extend their useful life. According to the results obtained, at the incubation temperature of 25 °C, *L. salivarius* showed a time interval of lag phase duration of approximately 2 h. This was the time without observation of significant increase in the number of cells, which corresponds to the period of adaptation of the microorganism in the culture medium. A period of approximately 2 h was also observed by Mis Solval et al. [29], when studying the growth kinetics of *Lactobacillus plantarum* NRRLB-4496, *Lactobacillus aci-*

dophilus NRRLB-4495 and *Lactobacillus reuteri* B-1417 in a medium containing hydrolyzed egg white. Mustafa et al. [30] observed a short phase of adaptation of *Lactobacillus casei* in the fermentation of pomegranate (*Punica granatum*) juice. The growth curves of *L. salivarius* fermented at temperatures of 35 and 45 °C showed a short adaptation period (<2 h), which demonstrates a better adaptation of the microorganism to the filmogenic solutions under these fermentation conditions.

In the present study, the greatest growth of *L. salivarius* in gelatin- and inulin-based filmogenic solutions occurred when they were fermented at 45 °C, as there was an increase of approximately 2 LogCFU·mL⁻¹ compared to the initial concentration of cells. At temperatures of 25 and 35 °C, there was an increase of approximately 1 LogCFU·mL⁻¹ of the initial cell concentration. The cell production of *L. salivarius* in filmogenic solutions was inferior to the growth of other microorganisms of the same genus, *Lactobacillus*. As an example, Lin et al. [31] observed an increase of approximately 5 LogCFU·mL⁻¹ of the initial cell concentration, when studying the growth of *Bifidobacterium* and *Lactobacillus* in soy milk and Man, Rogosa and Sharpe (MRS) medium. However, the development of probiotic microorganisms in different culture media is influenced by extrinsic and intrinsic factors of the system in which fermentation is carried out. Monteiro et al. [32], in a study on the growth of *L. reuteri* cells in passion fruit pulp, reported an increase in the initial number of cells of 1 LogCFU·mL⁻¹, when the pulp was fermented at 35 °C. These researchers showed the importance of studying fermentation conditions and the limiting factor of the culture medium composition.

In view of the results obtained in the present study, it was estimated that the maximum concentration of cells was obtained after 4 h of fermentation; the higher concentrations were related to the experiments where fermentation was carried out at a temperature of 45 °C.

Table 2 summarizes the biological and physicochemical characteristics obtained from the experimental data after 4 h of fermentation of filmogenic solutions with *L. salivarius*. The effects of independent variables on fermentation with *L. salivarius* in filmogenic solutions showed that incubation temperature during fermentation influenced the population of cells in the filmogenic solutions, regardless of gelatin (Figure 1a) and inulin (Figure 1b) concentrations.

As suggested in Figure 1, temperature has a significant effect on the fermentation; probiotic cells reach a maximum number when the process occurs at 45 °C, which is the most indicated temperature for the growth of *L. salivarius*.

Equation (10) shows the statistically significant effect of temperature on the concentration of probiotic cells in the filmogenic solutions.

$$\text{LogCFU}\cdot\text{mL}^{-1} = 9.58 + 0.0532 \times T \quad (10)$$

with $R^2 = 0.806$, where LogCFU·mL⁻¹ represents the maximum cell concentration, and T is the temperature (°C). Thus, by Equation (10), LogCFU·mL⁻¹ varies between about 11 and 12, when the temperature ranges from 25 to 45 °C, respectively. Therefore, these results reasonably agree with the data in Table 2.

Equation (11) shows the model that describes the effect of temperature on the maximum growth rate of *L. salivarius* in the filmogenic solutions.

$$\mu_{\max} = 0.804 - 0.012 \times T \quad (11)$$

with $R^2 = 0.716$. Although the coefficient of determination of Equation (14) is low, this equation shows that the fermentation temperature significantly influences the maximum growth rate of *L. salivarius* in the filmogenic solutions. It is observed that, as the temperature increased from 25 to 45 °C, the maximum growth rate decreased.

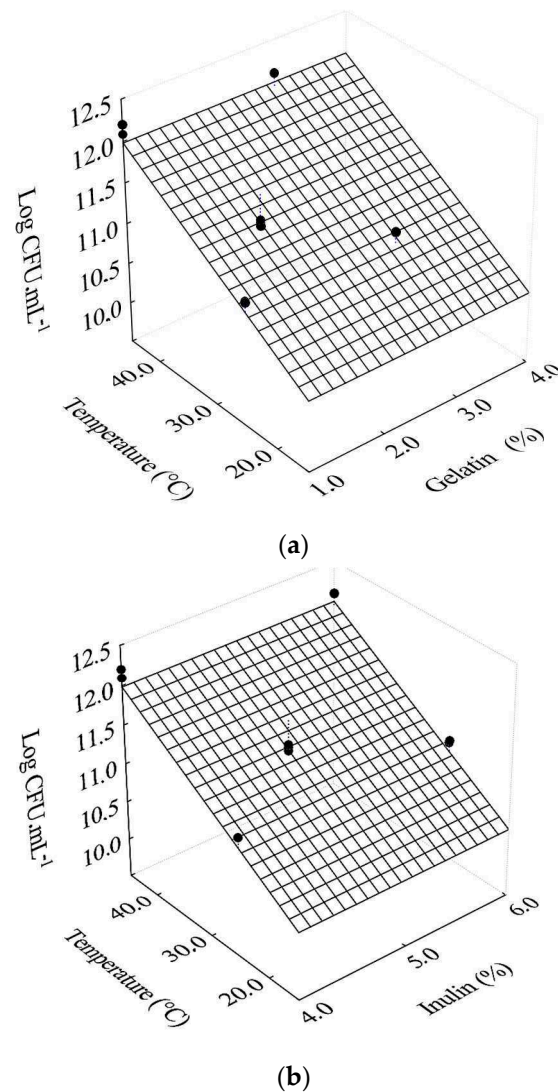


Figure 1. Response surfaces for the effects of temperature as a function of gelatin concentration (a) and inulin concentration (b) on cell concentration.

Monteiro et al. [32], when studying the growth of *L. reuteri* in passion fruit pulp, observed that the maximum rate of cell growth ranged from 0.009 to 0.097 h⁻¹, according to the influence of passion fruit pulp pH and fermentation temperature. Mestres et al. [33], studying the modeling of the mixed fermentation of gowé (Beninese fermented beverage made with malted and non-malted sorghum flour, which is produced by spontaneous fermentation involving mixed cultures of lactic acid bacteria and yeasts), using *L. plantarum* and *Pichia kluyveri* strain, observed a maximum growth rate of *Pichia kluyveri* of 0.73 h⁻¹, using the logistic model to determine this rate. On the other hand, Mechmeche et al. [34], when analyzing kinetics and studying mathematical modeling to determine growth parameters of *Lactobacillus plantarum* in protein-rich isolates from tomato seed, observed a maximum growth rate of 0.169 h⁻¹ (in the protein isolate of tomato seeds) and 0.363 h⁻¹ (in the MRS broth). The literature cited shows the influence of several factors on the growth rate of different microorganisms. In the present study, Table 2 showed a growth rate variation of 0.27 to 0.54 h⁻¹ in the experiments carried out at temperatures of 35 and 25 °C, respectively. This effect is observed in Figure 2a,b.

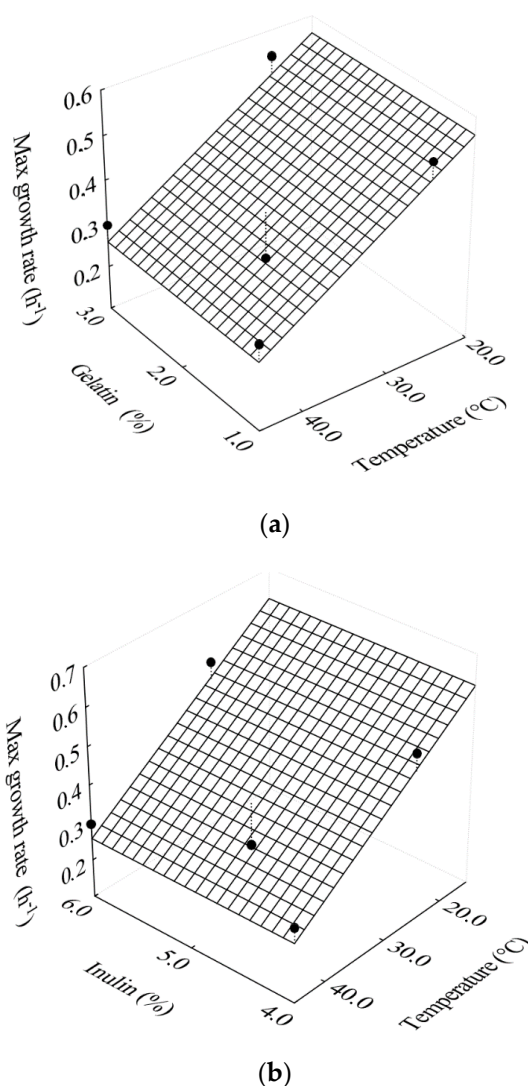
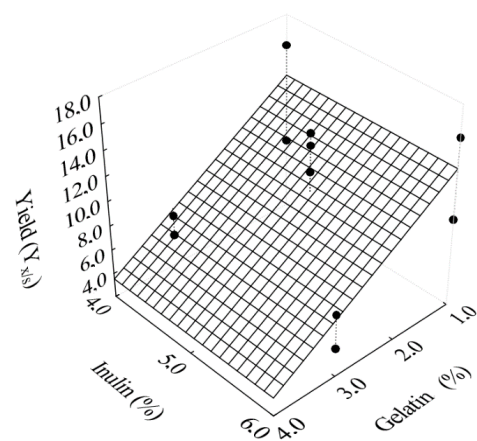


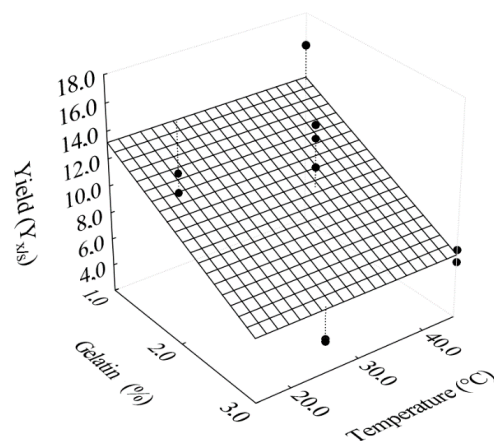
Figure 2. Response surfaces for the effects of temperature on the maximum cell growth rate as a function of (a) gelatin concentration; (b) inulin concentration.

Under ideal conditions, bacteria are the microorganisms with the highest growth rate and may have a generation time (t_g) of less than 1 h [32]. The generation time, which is the parameter that indicates the time required for the duplication of the cell population, ranged from 1.28 to 2.56 h in the present study. Generation time and pH were not statistically significant for the effects of independent variables on the fermentation process of filmogenic solutions.

Cell yield $Y_{X/S}$, which represents the cell mass produced by the amount of substrate consumed, had the effect of gelatin concentration, since the increase in gelatin concentration in filmogenic solutions resulted in a reduction in cell yield (Figure 3a,b).



(a)



(b)

Figure 3. Response surfaces for the effects of gelatin concentration on cell yield as a function of (a) inulin; (b) temperature.

The solutions with 3% gelatin in the formulation resulted in more visually consistent filmogenic solutions, approaching the semi-solid state, which can become a barrier for the growth of the microorganism. The model with statistically significant regression coefficients is presented in Equation (12). The influence of gelatin on the model representing cell yield obtained a coefficient of determination of 0.852, but after parameterization, the coefficient of determination decreased to 0.653. Although parameterization has resulted in a reduction in the coefficient of determination, this resource was adopted in order to eliminate the effects of non-significant parameters for cell yield.

$$Y_{X/S} = 12.432 - 0.068 \times G \quad (12)$$

with $R^2 = 0.653$, where G represents the gelatin concentration in the filmogenic solutions (%). Although the function presented by Equation (12) has a very low coefficient of determination and is not useful for predicting cell yield, both this equation and Figure 3 show a tendency of the behavior of the cell yield as related to the gelatin concentration.

Physicochemical parameters of filmogenic solutions were determined in order to evaluate the potential of these solutions for the incorporation of probiotics into foods (Table 2). The pH is one of the main factors influencing the growth of microorganisms. Initially, the pH values of the solutions were between 5.6 and 5.9, and the pH variation may have been influenced by composition. After 4 h of fermentation, the filmogenic solutions

had pH between 5.4 and 5.9 (Table 2). *L. salivarius* grows at optimum pH within the range from 5.5 to 6.5 [35]. It is worth pointing out that the filmogenic solutions based on gelatin and inulin have pH values within the range indicated as ideal, enabling the good development of *L. salivarius*.

According to Table 2, after 4 h of fermentation, soluble solids varied according to the concentration of gelatin and inulin. Soluble solids are composed largely of sugars and organic acids, as well as other constituents. Soluble solids are an important response of the fermentation process, and their quantity is influenced by the consumption of sugars by the microorganism and production of organic acids, such as lactic acid.

The concentration of reducing sugars was quantified in the filmogenic solutions, after 4 h of fermentation, and values between 1.06 and 1.71% were obtained, according to Table 2. Reducing sugars are simple sugars, and their presence in filmogenic solutions favors the development of lactic acid bacteria, which use simple sugars as the main source of energy. These values are different from the amount of sugars found in milk (4.49 g of lactose/100 g) [36] and in fruits such as passion fruit (4.86 g of glucose/100 g) [32], which have been studied for the production of probiotic foods. However, inulin is a widely studied prebiotic that acts as a substrate for the development of microorganisms, enabling a favorable environment for the growth of *L. salivarius* in filmogenic solutions.

The concentrations of inulin and gelatin in the filmogenic solutions resulted in significant variations in total soluble solids and reducing sugars (Figure 4a,b).

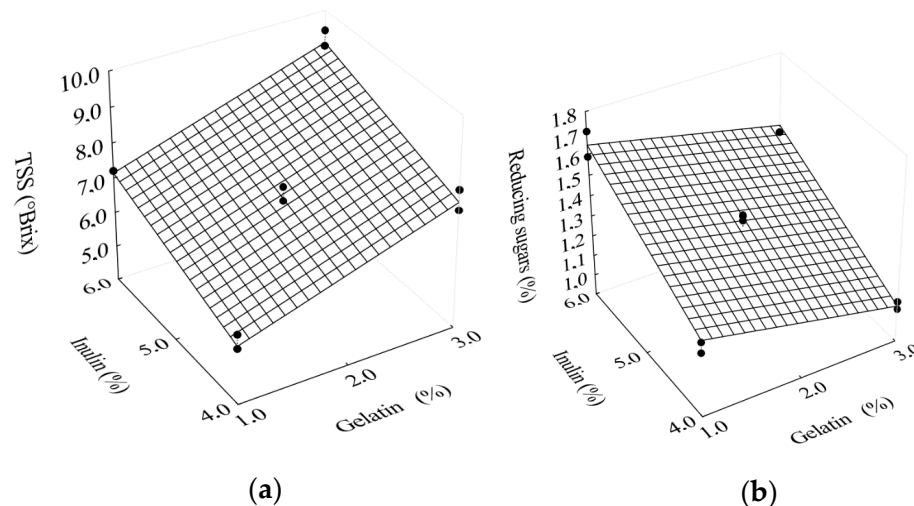


Figure 4. Response surfaces for the effects of gelatin and inulin concentrations as a function of (a) total soluble solids; (b) reducing sugars.

As can be seen in Figure 4a, the increase in inulin and gelatin concentrations led to the increase in total soluble solids. On the other hand, it is interesting to note in Figure 4b that the highest content of reducing sugars was obtained for the highest inulin concentration combined with the lowest gelatin concentration. Equations (13) and (14) show polynomial models with only statistically significant regression coefficients for the effects of gelatin and inulin concentrations on total soluble solids and reducing sugars, respectively.

$$\text{TSS} = 6.4972 + 0.0145 \times G + 0.0098 \times \text{In} \quad (13)$$

$$\text{RS} = 1.3373 - 0.0024 \times G + 0.0031 \times \text{In} \quad (14)$$

with $R^2 = 0.763$ and $R^2 = 0.889$, respectively. In Equations (13) and (14), RS represents the content of reducing sugars (%), In is the concentration of inulin (%) and TSS represents total soluble solids (°Brix).

The study of gelatin and inulin concentrations, as well as the fermentation temperature of filmogenic solutions, through the response surface methodology, promoted the opti-

mization of the fermentation process with *L. salivarius*. The results obtained showed that the most indicated conditions for the elaboration of probiotic filmogenic solutions were as follows: 1% gelatin, 4% inulin and fermentation at 45 °C (experiment 5). These conditions were defined according to the responses obtained for the physicochemical and biological characteristics of the probiotic filmogenic solutions that were statistically significant for, at least, one independent variable. The filmogenic solution obtained in experiment 5, initially presented a reducing sugar content of 1.35% and after 4 h of fermentation the reducing sugar content of the solution was 1.22% (Table 2), which means that in 4 h of fermentation approximately 9.6% of the reducing sugars present in the solution were consumed by *L. salivarius*. According to Ren et al. [37], the highest metabolic activity for the *L. salivarius* strain was observed when studying the use of maltose, raffinose, sucrose and glucose as preferred substrates. In this study, inulin-type fructan was used as a substrate. The temperature of 45 °C was selected based on the effect on cell concentration, and the highest growth was obtained in the experiments whose process occurred at this temperature. In addition, the concentrations of 1% gelatin and 4% inulin were the ones that most contributed to cell yield and correspond to experiment 5. Thus, the data of this experiment related to the kinetics of cell growth and substrate consumption were used in the following mathematical modeling.

3.2. Mathematical Modeling: Cell Growth and Substrate Consumption

Mathematical modeling in a fermentation process plays an important role, due to the guarantee of process control, economic production and increased product quality, since mathematical models are used to describe the production process under different fermentation conditions [15]. The mathematical models used in this study were selected based on the literature and are often used to describe both cell growth and substrate consumption. The Baranyi model, as well as the Gompertz, logistic and Weibull models, are some of the most used to predict experimental data and parameters of biological significance of fermentations.

3.2.1. Cell Growth

The experimental data to be analyzed refer to the curve of cell growth in the filmogenic solution and were obtained under the following conditions: 1% gelatin, 4% inulin at 45 °C (experiment 5). The results of the fitting of the selected functions to the experimental data are presented in Table 3.

An inspection in Table 3 makes it possible to state that the Baranyi, Gompertz, generalized Gompertz, logistic, modified logistic and Weibull models had coefficients of determination greater than 0.920, low chi-squares, and bias factor and accuracy factor equal or very close to 1, indicating a good agreement between the experimental data and the corresponding values predicted by the analyzed models. However, some of the parameters determined for these models did not show statistical significance, according to the results obtained by the Student's *t*-test. As it is known, Student's *t*-test is used in curve fitting to calculate the probability of a parameter being zero, despite the value determined in the fit.

The results of Table 3 indicate that, for the Baranyi model, the parameters μ_{\max} and λ have a 100% probability of being zero, despite the values determined in the fitting. Thus, as these parameters have no statistical significance, the Baranyi model was rejected to represent the cell growth data under study. However, it is important to note that Costa et al. [38], Martins et al. [39] and Tarlak et al. [14] used in their works the Baranyi model to estimate parameters of biological significance relative to the (1) growth of *Lactobacillus* and its inhibitory capacity against *Listeria monocytogenes* in culture medium; (2) quantification of lactic acid bacteria in samples of cooked meat in vacuum packaging; (3) growth kinetics of *Pseudomonas* spp. on button mushrooms (*Agaricus bisporus*) under isothermal and non-isothermal conditions, respectively. By fitting the Baranyi model to experimental data, these authors successfully estimated the maximum cell growth rate, the duration of the lag phase and the maximum cell population.

Table 3. Parameters of the models for the cell growth process in the filmogenic solution.

Parameters	Baranyi Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	10.180 ± 0.100	83.585	0.000	0.982	0.059	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	12.013 ± 0.100	204.763	0.000				
μ _{max} (h ⁻¹)	9.342 ± 883,919.2	0.000	1.000				
λ (h)	1.894 ± 10,199.1	0.000	1.000				
Parameters	Gompertz Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	12.024 ± 0.107	112.864	0.000	0.923	0.253	1.000	1.003
μ _{max} (h ⁻¹)	0.583 ± 0.171	3.416	0.019				
I (h)	-3.025 ± 0.936	-3.233	0.023				
Parameters	Generalized Gompertz Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	10.180 ± 0.000	83.5850	0.000	0.982	0.059	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	12.013 ± 0.000	220.555	0.000				
μ _{max} (h ⁻¹)	9.211 ± 5,247,461	0.000	1.000				
I (h)	1.954 ± 26,231	0.000	1.000				
Parameters	Logistic Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	12.024 ± 0.104	116.106	0.000	0.925	0.246	1.000	1.003
μ _{max} (h ⁻¹)	0.608 ± 0.167	3.633	0.015				
I (h)	-2.755 ± 0.822	-3.354	0.020				
Parameters	Modified Logistic Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	10.180 ± 0.200	51.295	0.000	0.982	0.059	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	12.013 ± 0.100	220.562	0.000				
μ _{max} (h ⁻¹)	23.910 ± 976,321	0.000	1.000				
λ (h)	1.740 ± 10,631.1	0.000	1.000				
Parameters	Weibull Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	10.180 ± 0.122	83.733	0.000	0.982	0.059	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	12.013 ± 0.050	241.333	0.000				
k ₁	0.470 ± 0.072	6.468	0.003				
δ ₁	5.018 ± 12.417	0.404	0.707				

A₀ = minimum concentration of cells; A_m = maximum concentration of cells; AF = accuracy factor; BF = bias factor; I = time at which growth rate; k₁ = rate at which the response variable approaches its maximum potential; R² = coefficient of determination; δ₁ = allometric constant; λ = duration of lag phase e μ_{max} = maximum growth rate; χ² = chi-square.

Table 3 also indicated that the Gompertz model has two parameters (μ_{max} and I) with probabilities of about 2% of being zero. For the generalized Gompertz model, the probabilities related to the parameters μ_{max} and I are 100%, and therefore, these two models (Gompertz and generalized Gompertz) were also rejected in the prediction of growth data in the present article. On the other hand, the Gompertz and generalized Gompertz models were used by Germec et al. [15] to fit cell growth, product formation, and sugar consumption of batch lactic acid (LA) fermentation in stirred tank bioreactor with carob extract. According to the authors, these models showed a good fit to the biomass production data, with coefficients of determination close to 1.00 for both models.

By re-inspecting Table 3, it can be noted that the modified logistic and logistic models should be rejected because some of their parameters have no statistical significance. It should be pointed out, however, that Munanga et al. [40] studied the modeling of lactic

fermentation of gowé and obtained a good fit of the logistic model to the experimental data of *Lactobacillus brevis* and *L. plantarum* growth during fermentation. The modified logistic model was also successfully used by Ilgin et al. [16] to describe fermentative processes in the production of inulinase from carob extract using *Aspergillus niger*. According to the authors, a good fit of this model to the experimental data was obtained, with a coefficient of determination of 0.988, and also with a bias factor and accuracy factor of 0.95 and 1.14, respectively.

In regard to the Weibull model, the information in Table 3 indicates that, although the parameter k_1 has a probability well below 1%, the parameter δ_1 has a probability of about 71% of being zero, despite the value obtained in the fitting. Thus, the Weibull model was also rejected to represent the cell growth studied in this article.

Although the six models initially selected to describe cell growth kinetics have been successfully used in the literature, none of them could be recommended for this purpose in the present study. In this context, it is important to highlight the statement made by Silva et al. [41], citing van Boekel [42], that from a rigorous point of view, parameters obtained from experimental data without taking into account statistical indicators, in particular the Student's *t*-test, can be considered uninterpretable.

Thus, the solution proposed in the present study was to use LAB Fit Curve Fitting Software (www.labfit.net) to discover another fitting function, taking advantage of a particular feature of this software program: LAB Fit has a library with more than 200 simple functions, with 1, 2, 3 and 4 parameters. More than that, LAB Fit has a feature called "Finder", which makes it possible to fit all the functions of its library to a single set of experimental data, in a few seconds, and the best functions are chosen based on the lowest chi-squares obtained. Thus, by using the "Finder" and stipulating functions with up to three fitting parameters, the following result was obtained for the growth data: function numbers 81 (logistic, $R^2 = 0.9250$), function number 80 (Gompertz, $R^2 = 0.9229$) and function number 57, given by $Y = A + B \times \text{EXP}(C \times X)$, $R^2 = 0.9208$. As the first two of the three functions had been previously rejected, the third function was further investigated in an attempt to avoid non-significant parameters and to increase the coefficient of determination R^2 by fitting this function to cell growth data.

Parameters A and B of function number 57 have physical interpretations related to cell concentrations, and parameter C is related to growth rate. Thus, these parameters were kept as they are, and only a possible change in exponent 1 was investigated, which can be explained in the expression $\text{EXP}((C \times X)^1)$. This exponent 1, which defines an exponential function, could be, a priori, increased to 2 or 3, defining sigmoid functions. In a first investigation, the exponent was established with the value 2, instead of 1, and the coefficient of determination of the fit to the growth data increased from 0.9208 to 0.9710. In a second attempt, the value 3 was assigned to the exponent, and the fitting determination coefficient increased to 0.9813. However, in order to resist the temptation to further increase the exponent, it should be noted that $\text{EXP}(-(0.45 \times 14)^2) = 5.78 \times 10^{-18}$. Additionally, in terms of computational calculations, $\text{EXP}(-(0.45 \times 14)^3) = 0.0$. It is worth pointing out that 0.45 h^{-1} and 14 h are typical values of growth rate and maximum experimental time in the present study. Thus, the exponent for the function proposed here was established with the value 3, and Statistica software was used again to fit function number 57 to the growth data, being rewritten as follows:

$$A(t) = A_m - (A_m - A_0) \exp\left(-(k_1 t)^3\right) \quad (15)$$

Table 4 shows the results regarding the fit of the proposed model, Equation (15), to the data of *L. salivarius* growth in the filmogenic solution.

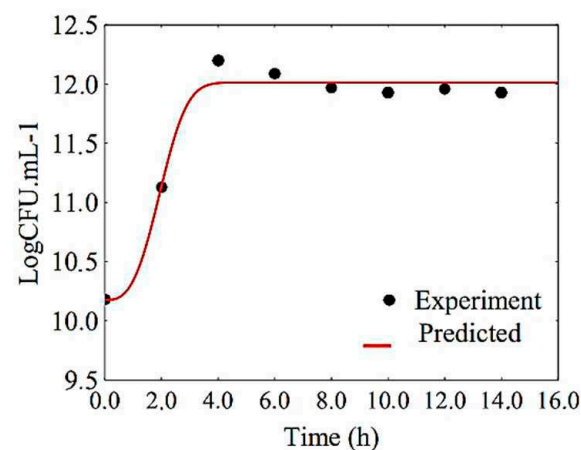
Table 4. Parameters of the proposed model for the cell growth process in the filmogenic solution.

Parameters	Proposed Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogUFC.mL ⁻¹)	10.18 ± 0.11	264.668	0.000	0.981	0.061	1.000	1.001
A _m (LogUFC.mL ⁻¹)	12.013 ± 0.045	91.953	0.000				
k ₁	0.453 ± 0.029	15.548	0.000				

A₀ = minimum concentration of cells; A_m = maximum concentration of cells e k₁ = rate at which the response variable approaches its maximum potential.

The results obtained with the fit of the proposed model to the experimental data of cell growth showed that all three parameters have a 0% probability of being zero, and therefore, all parameters determined can be considered significant. Although simple, the results obtained showed that the proposed model was the most adequate to describe the growth of *L. salivarius* in the filmogenic solution during fermentation.

Figure 5 shows the growth of *L. salivarius* in the filmogenic solution during fermentation. As can be observed, the parameters obtained resulted in a good fit of the proposed model to the experimental growth data. On the other hand, one should note that all phases of cell growth, except the decline phase, were satisfactorily simulated. The phase of decline or cell death began after 14 h of fermentation, and the data of this phase were not included in the mathematical modeling, since the present study did not aim to determine parameters that included this type of biological effect.

**Figure 5.** Curve of *L. salivarius* growth in the filmogenic solution represented by the proposed model.

To complement the statistical information relative to the proposed model, the matrix of covariances, involving the parameters $a_1 \equiv A_m$, $a_2 \equiv A_0$ and $a_3 \equiv k_1$ should also be informed:

$$\text{cov} = \begin{bmatrix} 2.06023 \times 10^{-3} & 3.70901 \times 10^{-5} & -2.75671 \times 10^{-4} \\ 3.70901 \times 10^{-5} & 1.22479 \times 10^{-2} & -1.35868 \times 10^{-3} \\ -2.75671 \times 10^{-4} & -1.35868 \times 10^{-3} & 8.47428 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Thus, the uncertainty of the value of function A(t), given by Equation (15), for any instant t, can be calculated by the general error propagation formula [43,44]:

$$\sigma_{A(t)} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial A(t)}{\partial a_j} \frac{\partial A(t)}{\partial a_k} \text{cov}(a_j, a_k)} \quad (17)$$

Thus, with the expression of A(t) given by Equation (15), in LogCFU·mL⁻¹, and the uncertainty $\sigma_{A(t)}$ given by Equation (17), and also with the values obtained for the parame-

ters given in Table 4, as well as the matrix of covariances given by Equation (16), the value of $A(t)$ for a given instant t can be calculated for several moments.

3.2.2. Substrate Consumption

The Baranyi, Gompertz and logistic models were tested to describe substrate consumption during fermentation but did not fit to the experimental data. The other models involved in this study were fitted to the experimental data of substrate consumption, and the results are summarized in Table 5.

Table 5. Parameters of the models for the substrate consumption process in the filmogenic solution.

Parameters	Generalized Gompertz Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	1.217 ± 0.003	467.281	0.000	0.991	0.000133	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	1.986 ± 565.278	0.004	0.997				
μ _{max} (h ⁻¹)	1.860 ± 37.87	0.049	0.963				
I (h)	-0.89 ± 460.658	-0.002	0.999				
Parameters	Modified Logistic Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	1.217 ± 0.003	466.927	0.000	0.991	0.000133	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	3.734 ± 3248.14	0.001	0.999				
μ _{max} (h ⁻¹)	0.560 ± 11.056	0.051	0.962				
λ (h)	-2.655 ± 803.996	-0.003	0.998				
Parameters	Weibull Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	1.110 ± 0.025	43.735	0.000	0.995	0.000082	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	1.350 ± 0.005	291.934	0.000				
k ₁	0.003 ± 0.016	0.201	0.851				
δ ₁	0.054 ± 0.040	1.354	0.247				
Parameters	Proposed Model						
	Estimated	t-Value	p-Level	R ²	χ ²	BF	AF
A ₀ (LogCFU·mL ⁻¹)	1.217 ± 0.002	577.116	0.000	0.991	0.000133	1.000	1.001
A _m (LogCFU·mL ⁻¹)	1.350 ± 0.005	261.426	0.000				
k ₁	0.773 ± 0.116	6.635	0.001				

A₀ = minimum concentration of substrate; A_m = maximum concentration of substrate; I = time at which rate substrate consumption is maximum; k₁ = rate at which the response variable approaches its maximum potential; δ₁ = allometric constant; λ = duration of lag phase e μ_{max} = maximum substrate consumption rate.

The generalized Gompertz and modified logistic models had a coefficient of determination of 0.991, while the Weibull model showed a coefficient of determination of 0.995. However, the parameters A_m, μ_{max} and I of the generalized Gompertz model did not show statistical significance. Similarly, the parameters μ_{max}, A_m and λ of the modified logistic model have no statistical significance. Additionally, the parameters k₁ and δ₁ of the Weibull model are also not significant. On the other hand, the model proposed in this article (which can ultimately be interpreted as a modification of the Weibull model in which δ₁ was fixed with the value 3.0) had a coefficient of determination equal to 0.991, a chi-square of 0.000133, and bias factor and accuracy factor close to 1. For the proposed model, the probability of the parameter k₁ being zero, despite having the obtained value, is only 0.1%. Thus, of all the results obtained in Table 5, the model proposed in this article can be considered as the most acceptable to describe the substrate consumption in the filmogenic solution during fermentation with *L. salivarius*.

Reducing carbohydrates are consumed by *L. salivarius* during the fermentation process. In the first hours of fermentation, a sharp reduction was observed in this amount, as shown

in Figure 6, which corresponds to the period of exponential growth of cell concentration in the filmogenic solution.

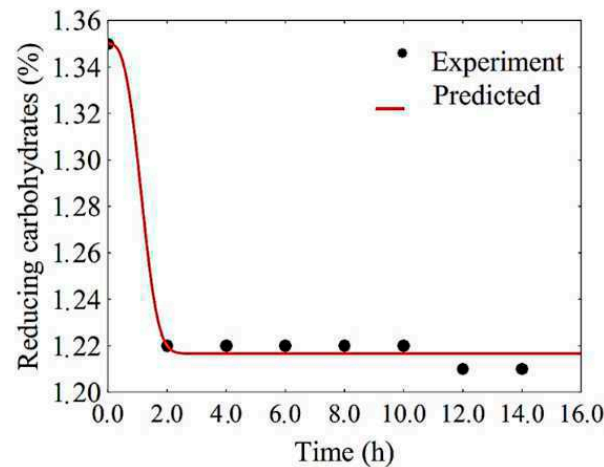


Figure 6. Substrate consumption curve during fermentation with *L. salivarius* in the filmogenic solution with fitting of the proposed model.

As can be seen in Figure 6, the concentration of reducing carbohydrates has its value stabilized between 2 and 4 h of the process. On the other hand, the decrease in the concentration of these carbohydrates occurs during the fermentation of the filmogenic solution, which is expected because the main metabolic process of lactic bacteria, such as *L. salivarius*, uses monosaccharides such as fructose, glucose and lactose for the production of energy and, therefore, lactic acid [32].

It is interesting to note that this behavior was well simulated by the proposed model. On the other hand, the matrix of covariances obtained by fitting this model to the experimental data of substrate consumption are given by:

$$\text{cov} = \begin{bmatrix} 4.44444 \times 10^{-6} & 1.32349 \times 10^{-23} & 1.05832 \times 10^{-4} \\ 1.32349 \times 10^{-23} & 2.66667 \times 10^{-5} & 1.62818 \times 10^{-5} \\ 1.05832 \times 10^{-4} & 1.62818 \times 10^{-5} & 1.84358 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Therefore, this is all the information needed for complete determination of the amount of substrate (reducing sugars, %) over time. Using Equations (17) and (18), it is possible to observe that, for $t \geq 3.0$ h, this amount is given by $RS = (1.217 \pm 0.006)$ %, with a confidence level of 95.4%.

4. Conclusions

The growth of *L. salivarius* in gelatin- and inulin-based filmogenic solution has proved to be a viable alternative for incorporating probiotic bacteria into various food products. The use of probiotic filmogenic solution in food contributes to the development of innovative products with functional characteristics. The thin layer formed on the product's surface forms a barrier that controls the contact of the food with the external environment, reducing the transfer of mass, which leads to an increase in its useful life, through the conservation of its sensory and nutritional characteristics. Evaluating the impacts of process conditions on cell development is fundamental and a key factor in making the process applicable in the industry. This study showed that the optimal conditions for the development of probiotic cells in the filmogenic solution were 1% gelatin combined with 4% inulin, fermented at 45 °C.

The analysis performed through the Student's *t*-test of the parameters obtained by fitting the primary models selected in this work and widely used in predictive microbiology showed the inadequacy of such models to describe cell growth and substrate

consumption during fermentation of filmogenic solution with *L. salivarius*. A simple model was then proposed in this article, with three fitting parameters, which described well the production of cells ($R^2 = 0.981$, $\chi^2 = 0.061$, BF = 1.000 and AF = 1.001) and substrate consumption ($R^2 = 0.991$, $\chi^2 = 0.000133$, BF = 1.000 and AF = 1.001). In this new model, the Student's *t*-test revealed that all three parameters obtained by curve fitting can be considered statistically significant.

Author Contributions: Conceptualization, S.S.M. (Shênia Santos Monteiro), W.P.d.S., A.J.d.M.Q., R.M.F.d.F., J.P.G. and A.G.B.d.L.; data curation, S.S.M. (Shirley Santos Monteiro) and A.P.T.R.; formal analysis, W.P.d.S., S.S.M. (Shênia Santos Monteiro), R.M.F.d.F., J.P.G. and H.A.S.; investigation, L.R.B.d.A., E.M.P.; methodology, W.P.d.S., A.J.d.M.Q.; software, W.P.d.S., M.R.S.d.S. and A.G.B.d.L.; supervision, W.P.d.S., A.J.d.M.Q., R.M.F.d.F., J.P.G. and A.G.B.d.L.; validation, W.P.d.S. and J.P.G.; visualization, W.P.d.S. and S.S.M. (Shênia Santos Monteiro); writing—original draft, S.S.M. (Shênia Santos Monteiro) and W.P.d.S.; writing—review and editing, W.P.d.S. and A.G.B.d.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors thank the Federal University of Campina Grande and CAPES for their financial support. The second author would like to thank CNPq (National Council for Scientific and Technological Development) for supporting this study and for his research grant (Process Number 301708/2019-3; PQ-1A).

Acknowledgments: The authors are grateful to the Federal University of Campina Grande (Brazil) for the research infrastructure.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Duar, R.M.; Lin, X.B.; Zheng, J.; Martino, M.E.; Grenier, T.; Pérez-Muñoz, M.E.; Leulier, F.; Gänzle, M.; Walter, J. Lifestyles in transition: Evolution and natural history of the genus *Lactobacillus*. *FEMS Microbiol. Rev.* **2017**, *41*, S27–S48. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Messaoudi, S.; Manai, M.; Kergourlay, G.; Prévost, H.; Connil, N.; Chobert, J.-M.; Dousset, X. *Lactobacillus salivarius*: Bacteriocin and probiotic activity. *Food Microbiol.* **2013**, *36*, 296–304. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Soukoulis, C.; Behboudi-Jobbehdar, S.; Macnaughtan, W.; Parmenter, C.; Fisk, I.D. Stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG incorporated in edible films: Impact of anionic biopolymers and whey protein concentrate. *Food Hydrocoll.* **2017**, *70*, 345–355. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Gregirchak, N.; Stabnikova, O.; Stabnikov, V. Application of Lactic Acid Bacteria for Coating of Wheat Bread to Protect it from Microbial Spoilage. *Plant Foods Hum. Nutr.* **2020**, *75*, 223–229. [[CrossRef](#)]
- Umaraw, P.; Munekata, P.E.; Verma, A.K.; Barba, F.J.; Singh, V.P.; Kumar, P.; Lorenzo, J.M. Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products. *Trends Food Sci. Technol.* **2020**, *98*, 10–24. [[CrossRef](#)]
- Thakur, R.; Pristijono, P.; Golding, J.B.; Stathopoulos, C.; Scarlett, C.; Bowyer, M.; Singh, S.; Vuong, Q. Development and application of rice starch based edible coating to improve the postharvest storage potential and quality of plum fruit (*Prunus salicina*). *Sci. Hortic.* **2018**, *237*, 59–66. [[CrossRef](#)]
- Pereira, J.O.; Soares, J.; Monteiro, M.J.P.; Amaro, A.; Gomes, A.; Pintado, M. Cereal bars functionalized through *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB-12 and inulin incorporated in edible coatings of whey protein isolate or alginate. *Food Funct.* **2019**, *10*, 6892–6902. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Rojas-Graü, M.A.; Soliva-Fortuny, R.; Martín-Belloso, O. Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2009**, *20*, 438–447. [[CrossRef](#)]
- Leroy, F.; De Vuyst, L. A Combined Model to Predict the Functionality of the Bacteriocin-Producing *Lactobacillus sakei* Strain CTC 494. *Appl. Environ. Microbiol.* **2003**, *69*, 1093–1099. [[CrossRef](#)]
- Whiting, R.C. Microbial modeling in foods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **1995**, *35*, 467–494. [[CrossRef](#)]
- Baranyi, J.; Roberts, T.A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *Int. J. Food Microbiol.* **1994**, *23*, 277–294. [[CrossRef](#)]
- Ratkowsky, D.A.; Olley, J.; McMeekin, T.A.; Ball, A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *J. Bacteriol.* **1982**, *149*, 1–5. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Taoukis, P.S.; Koutsoumanis, K.; Nychas, G.J.E. Use of time–temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions. *Int. J. Food Microbiol.* **1999**, *53*, 21–31. [[CrossRef](#)]
- Tarlak, F.; Ozdemir, M.; Melikoglu, M. Predictive modelling for the growth kinetics of *Pseudomonas* spp. on button mushroom (*Agaricus bisporus*) under isothermal and non-isothermal conditions. *Food Res. Int.* **2020**, *130*, 108912. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Germec, M.; Karhan, M.; Bialka, K.L.; Demirci, A.; Turhan, I. Mathematical modeling of lactic acid fermentation in bioreactor with carob extract. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **2018**, *14*, 254–263. [[CrossRef](#)]

16. Ilgin, M.; Germec, M.; Turhan, I. Inulinase production and mathematical modeling from carob extract by using *Aspergillus niger*. *Biotechnol. Prog.* **2020**, *36*, e2919. [[CrossRef](#)]
17. Da Silva, N.B.; Longhi, D.A.; Martins, W.F.; Laurindo, J.B.; De Aragão, G.M.F.; Carciofi, B.A.M. Modeling the growth of *Lactobacillus viridescens* under non-isothermal conditions in vacuum-packed sliced ham. *Int. J. Food Microbiol.* **2017**, *240*, 97–101. [[CrossRef](#)]
18. Janjarasskul, T.; Krochta, J.M. Edible Packaging Materials. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2010**, *1*, 415–448. [[CrossRef](#)]
19. StatSoft Inc. Statistica (Data Analysis Software System), Version 7.0. 2005. Available online: www.statsoft.com (accessed on 18 December 2020).
20. Miller, G.L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Anal. Chem.* **2005**, *31*, 426–428. [[CrossRef](#)]
21. Juneja, V.K.; Valenzuela-Melendres, M.; Huang, L.; Subbiah, J.; Thippareddi, H. Mathematical modeling of growth of *Salmonella* in raw ground beef under isothermal conditions from 10 to 45 °C. *Int. J. Food Microbiol.* **2009**, *131*, 106–111. [[CrossRef](#)]
22. Gompertz, B. XXIV. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. In a letter to Francis Baily, Esq. F. R. S. &c. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **1825**, *115*, 513–583. [[CrossRef](#)]
23. Henderson, P.A.; Seaby, R.M.; Somes, R. *Growth II*; Pisces Conservation Ltd.: Lymington, UK, 2006; p. 97.
24. Pearl, R.; Reed, L.J. On the Rate of Growth of the Population of the United States since 1790 and Its Mathematical Representation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1920**, *6*, 275–288. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Zwietering, M.H.; Jongenburger, I.; Rombouts, F.M.; Van't Riet, K. Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Appl. Environ. Microbiol.* **1990**, *56*, 1875–1881. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Weibull, W. Wide applicability. *J. Appl. Mech.* **1951**, *103*, 293–297.
27. Ross, T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology. *J. Appl. Bacteriol.* **1996**, *81*, 501–508. [[CrossRef](#)]
28. Wang, J.; Chen, J.; Hu, Y.; Hu, H.; Liu, G.; Yan, R. Application of a Predictive Growth Model of *Pseudomonas* spp. for Estimating Shelf Life of Fresh *Agaricus bisporus*. *J. Food Prot.* **2017**, *80*, 1676–1681. [[CrossRef](#)]
29. Solval, K.M.; Chouljenko, A.; Chotiko, A.; Sathivel, S. Growth kinetics and lactic acid production of *Lactobacillus plantarum* NRRL B-4496, *L. acidophilus* NRRL B-4495, and *L. reuteri* B-14171 in media containing egg white hydrolysates. *LWT* **2019**, *105*, 393–399. [[CrossRef](#)]
30. Mustafa, S.M.; Chua, L.S.; El-Enshasy, H.A.; Majid, F.A.A.; Hanapi, S.Z. Kinetic profile and anti-diabetic potential of fermented *Punica granatum* juice using *Lactobacillus casei*. *Process. Biochem.* **2020**, *92*, 224–231. [[CrossRef](#)]
31. Lin, T.C.; Chen, B.Y.; Chen, C.Y.; Chen, Y.S.; Wu, H. Comparative analysis of spray-drying microencapsulation of *Bifidobacterium adolescentis* and *Lactobacillus acidophilus* cultivated in different growth media. *J. Food Process. Eng.* **2019**, *42*. [[CrossRef](#)]
32. Monteiro, S.S.; Beserra, Y.A.S.; Oliveira, H.M.L.; Pasquali, M.A.D.B. Production of Probiotic Passion Fruit (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.) Drink Using *Lactobacillus reuteri* and Microencapsulation via Spray Drying. *Foods* **2020**, *9*, 335. [[CrossRef](#)]
33. Mestres, C.; Munanga, B.D.J.C.; Grabulos, J.; Loiseau, G. Modeling mixed fermentation of gowé using selected *Lactobacillus plantarum* and *Pichia kluyveri* strains. *Food Microbiol.* **2019**, *84*, 103242. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Mechmeche, M.; Kachouri, F.; Yaghlane, H.B.; Ksontini, H.; Setti, K.; Hamdi, M. Kinetic analysis and mathematical modeling of growth parameters of *Lactobacillus plantarum* protein-rich isolates from tomato seed. *Food Sci. Technol. Int.* **2016**, *23*, 128–141. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Sayan, H.; Assavacheep, P.; Angkanaporn, K.; Assavacheep, A. Effect of *Lactobacillus salivarius* on growth performance, diarrhea incidence, fecal bacterial population and intestinal morphology of suckling pigs challenged with F4+ enterotoxigenic *Escherichia coli*. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* **2018**, *31*, 1308–1314. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Ohlsson, J.A.; Johansson, M.; Hansson, H.; Abrahamson, A.; Byberg, L.; Smedman, A.; Lindmark-Månsson, H.; Lundh, Å. Lactose, glucose and galactose content in milk, fermented milk and lactose-free milk products. *Int. Dairy J.* **2017**, *73*, 151–154. [[CrossRef](#)]
37. Ren, H.; Zentek, J.; Vahjen, W. Optimization of Production Parameters for Probiotic *Lactobacillus* Strains as Feed Additive. *Molecules* **2019**, *24*, 3286. [[CrossRef](#)]
38. Costa, J.C.C.P.; Bolívar, A.; Valero, A.; Carrasco, E.; Zurera, G.; Pérez-Rodríguez, F. Evaluation of the effect of *Lactobacillus sakei* strain L115 on *Listeria monocytogenes* at different conditions of temperature by using predictive interaction models. *Food Res. Int.* **2020**, *131*, 108928. [[CrossRef](#)]
39. Martins, W.F.; Longhi, D.A.; De Aragão, G.M.F.; Melero, B.; Rovira, J.; Diez, A.M. A mathematical modeling approach to the quantification of lactic acid bacteria in vacuum-packaged samples of cooked meat: Combining the TaqMan-based quantitative PCR method with the plate-count method. *Int. J. Food Microbiol.* **2020**, *318*, 108466. [[CrossRef](#)]
40. Munanga, B.D.J.C.; Loiseau, G.; Grabulos, J.; Mestres, C. Modeling Lactic Fermentation of Gowé Using *Lactobacillus* Starter Culture. *Microorganisms* **2016**, *4*, 44. [[CrossRef](#)]
41. Silva, W.P.; De Medeiros, M.S.; Gomes, J.P.; Silva, C.M.D.P.S. Improvement of methodology for determining local thermal diffusivity and heating time of green coconut pulp during its pasteurization. *J. Food Eng.* **2020**, *285*, 110104. [[CrossRef](#)]
42. Boekel, M. Statistical Aspects of Kinetic Modeling for Food Science Problems. *J. Food Sci.* **1996**, *61*, 477–486. [[CrossRef](#)]
43. Bevington, P.R.; Robinson, D.K. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 2nd ed.; WCB/McGraw-Hill: Boston, MA, USA, 1992.
44. Taylor, J.R. *An Introduction to Error Analysis*, 2nd ed.; University Science Books: Sausalito, CA, USA, 1997.