

MODELAGEM CINÉTICA DAS ALTERAÇÕES SENSORIAIS DE CUPCAKES DE CENOURA E CHOCOLATE DURANTE O ARMAZENAMENTO

Samuel Fernandes De Arruda¹, Érica Regina Bárbaro da Silva¹, Maria Clara Costa Alves¹, Jakeline Mendonça¹, Gean Jefferson Ramos de Figueiredo¹, Elciane Regina Zanatta²

¹Acadêmico de Engenharia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Medianeira, Paraná, Brasil, e-mail: samuelfernandesarruda@alunos.utfpr.edu.br

²Docente do Departamento de Alimentos – DAALM, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Medianeira – Paraná, Brasil, e-mail: elcianezanatta@utfpr.edu.br

Resumo: A vida de prateleira é essencial para garantir a qualidade dos alimentos. Este trabalho desenvolveu um modelo matemático para descrever a degradação sensorial de bolinhos de chocolate durante o armazenamento, utilizando regressão linear em dados da literatura. Os modelos apresentaram elevado ajuste (R^2 entre 0,8941 a 0,9733), com boa capacidade preditiva. A aparência foi o atributo com menor R^2 , enquanto a Textura apresentou maior R^2 .

Palavras-chave: vida de prateleira; modelagem matemática; regressão linear; análise sensorial; produtos de panificação.

KINETIC MODELING OF SENSORY CHANGES IN CARROT AND CHOCOLATE CUPCAKES DURING STORAGE

Abstract: Shelf life is essential for ensuring food quality during storage. This study developed a mathematical model to describe the sensory degradation of chocolate cupcakes during storage using linear regression based on data obtained from the literature. The models showed a high goodness of fit, with coefficients of determination (R^2) ranging from 0.8941 to 0.9733, indicating good predictive performance. Appearance exhibited the lowest R^2 value, whereas texture showed the highest R^2 value.

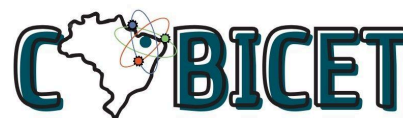
Keywords: Shelf life; mathematical modeling; linear regression; sensory analysis; bakery products.

INTRODUÇÃO

A segurança e a qualidade dos alimentos são pontos de extrema importância para a indústria, consumidores e órgãos reguladores. Durante o armazenamento e a distribuição, os alimentos estão sujeitos a uma série de reações físico-químicas e microbiológicas que resultam na deterioração de seus atributos de qualidade, como aparência, textura, sabor e valor nutricional (BIANCHI et al., 2024, Taglieri et al., 2021a). Este processo de degradação é impossível de ser evitado e define o tempo de vida de prateleira (shelf life) do produto que é o período em que o alimento mantém suas características

desejáveis sob condições específicas de estocagem, durante o armazenamento.

O nível crítico correspondente ao fim da vida de prateleira é determinado por exigências legais, como perdas nutricionais, e, principalmente, pelos atributos sensoriais valorizados pelos consumidores. Enquanto que a vida do alimento do ponto de vista da indústria alimentícia, é definida pela extensão da perda de qualidade que a empresa está disposta a aceitar antes do consumo do produto, já para os consumidores o fim da vida de prateleira corresponde ao momento em que o alimento deixa de apresentar as características sensoriais aceitáveis. Considerando



que é impossível satisfazer todos os consumidores em todas as situações e que os sistemas alimentares, bem como seus mecanismos de deterioração, são inerentemente complexos, uma definição universal de vida de prateleira é impossível de ser estabelecida, sendo necessário haver análise sensorial e uso de estatística. A despeito disso, a vida de prateleira pode ser determinada e posteriormente prevista para produtos alimentícios individuais com base em seu principal mecanismo de deterioração. (FU; LABUZA, 1993)

As perdas e o desperdício de alimentos constituem um problema global de grande magnitude, estimando-se que aproximadamente um terço dos alimentos produzidos para consumo humano seja perdido ou desperdiçado ao longo da cadeia produtiva (GUSTAVSSON et al., 2011). A previsão precisa da deterioração da qualidade permite que produtores e distribuidores otimizem o estoque, planejem a logística PEPS (primeiro a entrar, primeiro a sair) e garantam que o produto chegue ao consumidor final com a qualidade exigida.

A modelagem matemática tem sido amplamente utilizada na Ciência e Engenharia de Alimentos como uma ferramenta prática para descrever quantitativamente as alterações de qualidade que ocorrem durante o processamento e o armazenamento dos produtos alimentícios. Por meio da aplicação de modelos cinéticos e matemáticos, é possível representar a evolução de atributos físicos, químicos, microbiológicos e sensoriais em função do tempo, permitindo compreender os mecanismos envolvidos nos processos de deterioração. Esses modelos fornecem uma base científica para quantificar a velocidade das alterações de qualidade, avaliar o efeito de fatores como temperatura, umidade e condições de armazenamento, além de contribuir para a interpretação do comportamento dos alimentos sob diferentes condições. Dessa forma, a modelagem matemática auxilia na compreensão da dinâmica das mudanças de qualidade sensorial, no desenvolvimento e otimização de produtos e processos, no estabelecimento de estratégias de controle de qualidade e na obtenção de previsões que subsidiam estudos relacionados à estabilidade e à vida de prateleira dos alimentos (VAN BOEKEL, 2008).

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo principal ajustar modelos cinéticos de regressão linear aos dados de avaliação sensorial de um alimento armazenado por um período de 180 dias. Especificamente, buscou-se:

1. Determinar um modelo matemático que descreva a degradação dos atributos de aparência, textura, sabor e qualidade geral.

2. Calcular as constantes de degradação a e b para cada atributo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no artigo **ESTIMATING SENSORY SHELF LIFE OF CHOCOLATE AND CARROT CUPCAKES USING ACCEPTANCE TESTS** (Villanueva e Trindade (2010)) em que foi avaliado a vida de prateleira sensorial de bolinhos de chocolate e cenoura por meio de testes de aceitação realizados com consumidores, onde os bolinhos foram armazenado a uma temperatura ambiente constante por um período de 180 dias. As avaliações foram realizadas em intervalos de tempo específicos (0, 30, 60, 120, 150 e 180 dias). Os atributos de qualidade avaliados foram: aparência, textura, sabor e qualidade geral, utilizando uma escala hedônica de 9 pontos, onde notas mais altas indicam maior aceitação. Os dados originais, apresentados na Tabela 1, foram utilizados como base para a modelagem. Foi utilizado um modelo matemático de regressão linear (ordem zero): Este modelo assume que a taxa de degradação é constante, como mostrado nas equações 1 e 2:

$$Q(t) = b - a * t \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -a \quad (2)$$

Sendo:

$Q(t)$ é a qualidade no tempo t ,

b o (coeficiente linear) é a qualidade inicial (em $t=0$),
 a o (coeficiente angular) é a constante de degradação.

Inicialmente foram estimados os parâmetros dos modelos, $a = 8$ e $b = 0.01$, e depois foi utilizado o *software Microsoft Excel*, por meio da ferramenta *Solver* para encontrar os melhores valores para as constantes se aproximarem do valor real. O modelo aplicado a determinado atributo, com o maior R^2 e menor soma de quadrado do erro (SQE) foi considerado o mais adequado para descrever os dados. Posteriormente o *Excel* também foi utilizado para realizar análise estatística ANOVA, como demonstrado na Tabela 5, com o objetivo de ver se há diferença significativa entre os valores reais e os valores do modelo.

Tabela 1: Valores reais das notas hedônicas dos atributos sensoriais em relação ao tempo, coletados do artigo científico (Villanueva e Trindade (2010)).

Tempo (dias)	Aparência	Textura	Sabor	Qualidade
0	7,8	7,4	7,1	7,3
30	7,2	7,4	7,4	7,4
60	7,2	6,7	7,1	7
120	6,4	5,2	5,5	5,4
150	6,4	4,5	5,4	5,2
180	6,4	4,2	4,9	4,7

Fonte: Adaptado de Villanueva e Trindade (2010)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A qualidade do ajuste dos modelos matemáticos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da soma dos quadrados dos erros (SQE), conforme apresentado na Tabela 2. O coeficiente de determinação representa a proporção da variabilidade dos dados experimentais que é explicada pelo modelo ajustado, assumindo valores entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , maior será a capacidade do modelo em representar o comportamento observado dos dados, indicando melhor ajuste. Entretanto, não deve-se utilizar isoladamente o R^2 para avaliar a qualidade de um modelo, sendo recomendável sua análise em conjunto com medidas de erro. Nesse contexto, a soma dos quadrados dos erros quantifica a discrepância entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo, sendo calculada pela soma dos quadrados dos resíduos. Valores reduzidos de SQE indicam menor erro de ajuste e, consequentemente, maior capacidade preditiva do modelo (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012). Portanto, a utilização conjunta desses indicadores possibilita uma avaliação mais consistente do desempenho dos modelos matemáticos empregados

Tabela 2: Apresentação do erro para os parâmetros de aparência, textura, sabor e qualidade encontrados pelo modelo de ordem zero aplicado aos dados experimentais.

Aparência	ERRO	Textura	ERRO	Sabor	ERRO	Qualidade	ERRO
-----------	------	---------	------	-------	------	-----------	------

7,96	0,03	7,71	0,10	7,54	0,19	7,65	0,12
7,66	0,21	7,11	0,09	7,11	0,09	7,15	0,06
7,36	0,03	6,50	0,04	6,67	0,19	6,66	0,12
6,75	0,12	5,30	0,01	5,80	0,09	5,67	0,08
6,45	0,00	4,69	0,04	5,36	0,00	5,18	0,00
6,15	0,07	4,09	0,01	4,93	0,00	4,69	0,00
SQE	0,46	SQE	0,28	SQE	0,56	SSE	0,37

Fonte: Autoria própria (2026)

O somatório dos quadrados dos erros entre os valores reais e os valores do modelo, para todos os parâmetros de aparência, textura, sabor e qualidade, foram relativamente baixos, significando um bom índice de ajuste para o modelo.

Tabela 4: Valores das constantes da equação linear encontradas pelo *Solver* de acordo com cada atributo

Parâmetro	Aparência	Textura	Sabor	Qualidade
a	7,96	7,71	7,54	7,54
b	0,01	0,02	0,01	0,01
R^2	0,8941	0,9733	0,9051	0,9482

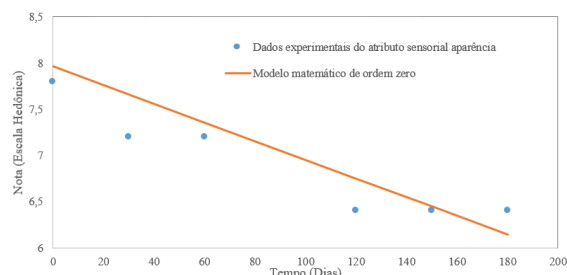
Fonte: Autoria própria (2026)

Observa-se que o atributo textura apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9733$), indicando que o modelo ajustado descreveu com elevada precisão a perda de aceitação ao longo do armazenamento.

Estudos sobre vida de prateleira de produtos de panificação demonstram que a formulação do produto e as condições de armazenamento influenciam significativamente a velocidade de deterioração dos atributos físico-químicos e sensoriais, resultando em diferentes taxas de perda de qualidade ao longo do armazenamento (BIANCHI et al., 2024).

Nas Figuras de 1 a 4, podemos encontrar o ajuste do modelo de ordem zero aos dados experimentais para as notas dos atributos aparência, textura, sabor e qualidade, em relação ao tempo de estocagem.

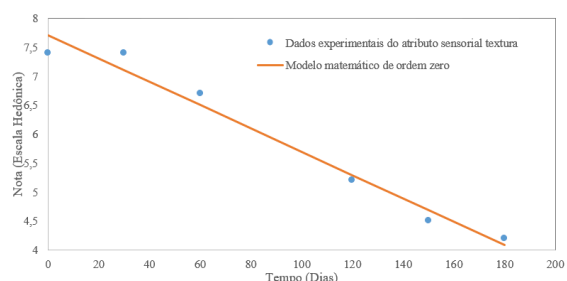
Figura 1: Ajuste do modelo de ordem zero aos dados experimentais da cinética de degradação do atributo sensorial aparência durante o armazenamento de cupcakes de cenoura e chocolate.



Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 1 apresenta as notas de aceitação da aparência dos bolinhos de chocolate durante os 180 dias de armazenamento. Observa-se uma redução gradual das notas ao longo dos dias, embora esse atributo tenha apresentado menor taxa de deterioração quando comparado aos outros. Mesmo ao final do período de armazenamento, as notas permaneceram acima de 6 pontos na escala hedônica, indicando uma boa aceitação visual do produto. A menor variação observada para o atributo aparência sugere que as alterações visuais do produto ocorreram de forma mais lenta que as alterações relacionadas ao consumo, como textura e sabor.

Figura 2: Ajuste do modelo de ordem zero aos dados experimentais da cinética de degradação do atributo sensorial textura durante o armazenamento de cupcakes de cenoura e chocolate.

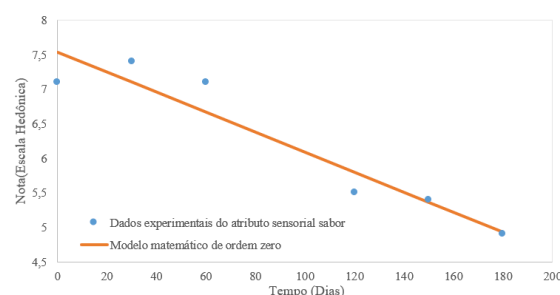


Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 2 mostra a cinética de degradação da textura dos bolinhos durante o armazenamento. É possível ver uma redução expressiva da aceitação ao

longo do tempo, sendo este o atributo que apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9733$). A diminuição das notas está associada principalmente ao endurecimento da estrutura do produto decorrente da perda de umidade e do processo de envelhecimento. A depender das características do produto alimentício e das condições do ambiente de armazenamento, pode ocorrer perda ou absorção de água pelo alimento, em decorrência das diferenças de atividade de água entre o produto e o meio, até que seja atingido o equilíbrio higroscópico (Labuza; Hyman, 1998).

Figura 3: Ajuste do modelo de ordem zero aos dados experimentais da cinética de degradação do atributo sensorial sabor durante o armazenamento de cupcakes de cenoura e chocolate.

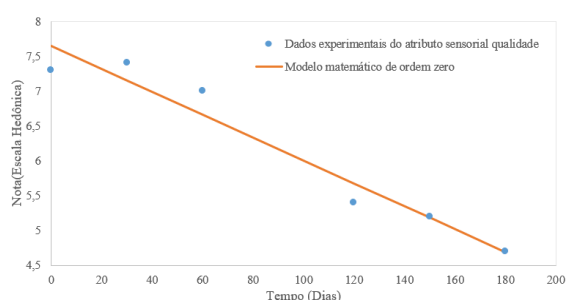


Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 3 apresenta as notas atribuídas ao sabor dos bolinhos durante o armazenamento. Observa-se uma tendência de redução gradual da aceitação, especialmente após 60 dias de armazenamento. É provável que a alteração de sabor tenha se dado por conta de oxidação lipídica.

A estabilidade oxidativa é um importante indicador para determinar a qualidade e a vida de prateleira dos óleos, já que compostos de baixo peso molecular são responsáveis por sabores e aromas indesejáveis gerados durante a oxidação. Esses compostos tornam os óleos menos aceitáveis ou até inaceitáveis para os consumidores e para o uso industrial como ingrediente alimentício (Hamilton, 1994). A oxidação dos óleos também destrói ácidos graxos essenciais e produz compostos tóxicos e polímeros oxidados.

Figura 4: Ajuste do modelo de ordem zero aos dados experimentais da cinética de degradação do atributo sensorial qualidade durante o armazenamento de cupcakes de cenoura e chocolate.



Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 4 apresenta a variação da qualidade geral dos bolinhos de chocolate ao longo do armazenamento. A redução progressiva das notas demonstra que os consumidores perceberam a deterioração global do produto com o passar do tempo. O elevado coeficiente de determinação obtido pelo modelo ($R^2 = 0,948$) indica que a regressão linear foi adequada para representar a perda de qualidade.

De maneira geral, todos os atributos avaliados apresentaram redução da aceitação ao longo do armazenamento, confirmando a ocorrência de processos de deterioração sensorial. A textura foi o atributo mais afetado, enquanto a aparência apresentou maior estabilidade. Esses resultados estão de acordo com diversos estudos de vida de prateleira de produtos de panificação, nos quais a perda de umidade e o endurecimento da estrutura são apontados como os principais fatores responsáveis pela redução da aceitação dos consumidores. Já em relação a equação do modelo utilizado, os elevados valores de R^2 obtidos demonstram que a modelagem matemática utilizada foi capaz de representar adequadamente a cinética de degradação dos atributos sensoriais, como demonstrado na Tabela 4.

Possuindo os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo, uma forma simples e prática para checar a similaridade ($\alpha = 0,05$) e verificar se existe diferença significativa entre os dados reais e os previstos pela modelagem, é utilizando o sistema ANOVA (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012). Aplicando, no *Excel*, os valores das Tabelas 1 e 3 do trabalho, os resultados são apresentados a seguir na tabela abaixo.

Tabela 5: Comparação estatística entre valores dos dados experimentais e os valores estimados pelo modelo matemático de ordem zero.

Atributo	F calculado	F crítico	p-valor
Aparência	0,1666	4,9656	0,6917
Textura	2,02E-10	4,9646	0,9999
Sabor	1,94E-10	4,9646	0,9999
Qualidade Geral	2,06E-10	4,9646	0,9999

Fonte: Autoria própria (2026)

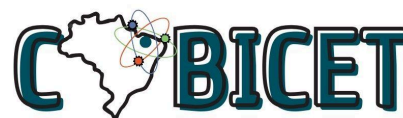
Comparando os valores observados experimentalmente com os valores estimados pelo modelo. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre os conjuntos de dados para os atributos aparência ($p = 0,6917$), textura ($p = 0,999$), sabor ($p = 0,999$) e qualidade geral ($p = 0,999$). Dessa forma, aceita-se a hipótese nula de igualdade entre os valores observados e preditos, demonstrando que o modelo foi capaz de representar adequadamente o comportamento dos dados experimentais durante o período de armazenamento.

Além disso, os baixos valores de F calculado, quando comparados aos valores de F crítico, reforçam que a variabilidade observada é predominantemente decorrente da dispersão natural dos dados experimentais, e não de erros sistemáticos do modelo. Esse comportamento indica que a regressão linear apresentou bom ajuste aos dados experimentais.

Portanto, os resultados do teste estatístico corroboram os elevados coeficientes de determinação (R^2) obtidos nos ajustes. A ausência de diferença significativa entre os valores reais e estimados indica que o simples modelo de regressão linear apresentou boa capacidade preditiva, podendo ser utilizado para descrever a cinética de degradação dos atributos sensoriais dos cupcakes de cenoura e chocolate.

CONCLUSÃO

O modelo cinético de regressão linear foi adequado para descrever a degradação dos atributos de qualidade sensorial (aparência, textura, sabor e qualidade geral) do alimento estudado durante os 180 dias de armazenamento, apresentando bons coeficientes de determinação ($R^2 > 0,8941$) e menores somas de erros.



A modelagem matemática demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a predição da perda de qualidade, o que pode auxiliar na definição do prazo de validade e na otimização das condições de armazenamento, contribuindo para a redução do desperdício de alimentos.

TRABALHOS FUTUROS

Para investigações futuras, uma das propostas é a aplicação da equação de *Arrhenius* para avaliar o efeito da temperatura sob condições dinâmicas de temperatura como no caso de estudos de vida de prateleira acelerados. Na vida real, os alimentos sofrem flutuações térmicas no transporte e no mercado, então a avaliação da degradação sensorial do alimento em diferentes temperaturas e a aplicação conjunto da *Equação de Arrhenius* combinada ao modelo linear poderá permitir prever a vida de prateleira, isto é, o shelf-life em qualquer cenário de armazenamento do mundo real.

Embora a regressão linear tenha apresentado um ótimo ajuste, a degradação de compostos químicos e atributos sensoriais muitas vezes segue cinéticas mais complexas. No futuro pode-se desenvolver pesquisas que venham a comparar o modelo linear com modelos matemáticos de maior complexidade, ordem superior, ou até mesmo modelos preditivos não-lineares. Isso ajudará a verificar se esses modelos reduzem ainda mais a soma de erros e explicam melhor o comportamento do alimento durante a vida útil.

Poderia ser pesquisado a relação entre a perda de atributos sensoriais como sabor, textura, é o reflexo de reações químicas internas como oxidação, e perda de umidade, por exemplo. Sugere-se então investigar a correlação matemática entre as notas dadas pelos provadores e parâmetros instrumentais quantificáveis como cor pela análise de colorimetria e a firmeza em pela análise no texturômetro, ou mesmo compostos voláteis por cromatografia. Isso permitiria criar um modelo onde análises de laboratório rápidas prevejam a aceitação sensorial do consumidor sem a necessidade de painéis de provadores constantes.

E por último, testar a eficácia do modelo linear desenvolvido aplicando-o ao mesmo alimento, mas utilizando diferentes materiais de embalagem como atmosfera modifica e filmes biodegradáveis. O objetivo seria avaliar se o modelo mantém o mesmo poder preditivo mudando a taxa de degradação provocada pela barreira protetora.

AGRADECIMENTOS

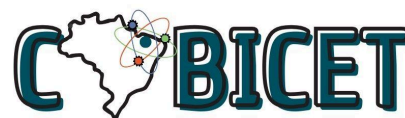
Expresso meus sinceros agradecimentos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelo suporte institucional, pela infraestrutura disponibilizada e pelo ambiente acadêmico. Agradeço ao Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (CoBICET) pela oportunidade de apresentar e divulgar os resultados deste trabalho, promovendo a troca de conhecimentos e o enriquecimento científico proporcionado pelo evento.

Manifesto minha especial gratidão à professora orientadora, pela dedicação, orientação, disponibilidade e valiosas contribuições ao longo de todas as etapas deste trabalho. Seus ensinamentos e incentivo foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Agradeço também aos meus colegas e amigos de trabalho, pelo apoio, companheirismo, incentivo e pelas experiências compartilhadas, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento e publicação deste estudo.

REFERÊNCIAS

- BIANCHI, A.; VENTURI, F.; PALERMO, C.; TAGLIERI, I.; ANGELINI, L. G.; TAVARINI, S.; SANMARTIN, C. **Primary and secondary shelf-life of bread as a function of formulation and MAP conditions: Focus on physical-chemical and sensory markers.** *Food Packaging and Shelf Life*, v. 41, art. 101241, 2024. DOI: 10.1016/j.fpsl.2024.101241. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101241>.
- GUSTAVSSON, J.; CEDERBERG, C.; SONESSON, U.; VAN OTTERDIJK, R.; MEYBECK, A. **Global food losses and food waste: extent, causes and prevention.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011. ISBN 978-92-5-107205-9.
- FU, B.; LABUZA, T. P. **Shelf-life prediction: theory and application.** *Food Control*, v. 4, n. 3, p. 125–133, 1993. DOI: 10.1016/0956-7135(93)90298-3.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis.** 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- HAMILTON, R. J. **The chemistry of rancidity in foods.** In: ALLEN, J. C.; HAMILTON, R. J. (ed.). *Rancidity in foods.* 3. ed. London: Blackie Academic & Professional, 1994. p. 1–21.



LABUZA, T. P.; HYMAN, C. R. **Moisture migration and control in multi-domain foods.** *Trends in Food Science & Technology*, v. 9, n. 2, p. 47–55, fev. 1998. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x .

VAN BOEKEL, M. A. J. S. **Kinetic modeling of food quality: a critical review.** *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 7, n. 1, p. 144–158, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x>.

VILLANUEVA, N. D. M.; TRINDADE, M. A. **Estimating sensory shelf life of chocolate and carrot cupcakes using acceptance tests.** *Journal of Sensory Studies*, v. 25, n. 2, p. 260–279, 2010. DOI: 10.1111/j.1745-459X.2009.00256.x