

# ADSORÇÃO DE FENÓLICOS EM CELULOSE BACTERIANA OTIMIZADA

NICOLE F. LIMA<sup>1\*</sup>  
GISELLE M. MACIEL<sup>2</sup>  
ISABELA A. A. FERNANDES<sup>3</sup>  
CHARLES W. I. HAMINIUK<sup>2</sup>

Este estudo explora a adsorção de compostos fenólicos em celulose bacteriana, um material derivado da cultura simbiótica de bactérias e leveduras presente na kombucha. A celulose bacteriana é predominantemente composta por bactérias do gênero *Komagataibacter* e é produzida por meio da fermentação do SCOBY em um meio nutritivo. Sua versatilidade a torna adequada para diversas aplicações devido à sua biodegradabilidade, pureza e biocompatibilidade. Através de métodos de produção e tratamento otimizados, a celulose bacteriana demonstrou a capacidade de adsorver fenólicos do chá verde, conferindo-lhe propriedades antioxidantes. Através da aplicação de diferentes modelos de isothermas, verificou-se que o modelo de Sips proporcionou o melhor ajuste aos dados experimentais. Ademais, as análises colorimétricas revelaram que a celulose bacteriana adsorvida apresentou quantidades significativas de fenólicos totais ( $884,04 \pm 42,92$ ), flavonoides totais ( $32,31 \pm 1,54$ ) e atividade antioxidante (DPPH:  $224,79 \pm 10,10$ ; ABTS:  $963,75 \pm 7,50$ ), enquanto a celulose bacteriana pura não exibiu tais características. Concluindo que a incorporação de compostos bioativos à celulose bacteriana pode conferir-lhe propriedades antioxidantes, potencialmente adequando-a para uso em embalagens alimentícias.

**PALAVRAS-CHAVE:** FLAVONOIDES, ATIVIDADE ANTIOXIDANTE, FERMENTAÇÃO, KOMBUCHA, CHÁ VERDE.

---

<sup>1</sup>Doutoranda do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná

<sup>2</sup>Professor(a) do Departamento de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

<sup>3</sup>Doutora em Engenharia de Alimentos

\*E-mail para correspondência: nicolefolmann@ufpr.br

## 1. INTRODUÇÃO

A celulose bacteriana (CB) pode ser produzida pela cultura simbiótica de bactérias e leveduras (SCOBY) da kombucha e é formada, principalmente, por bactérias do gênero *Komagataeibacter* (YAMADA et al., 2012). O processo de produção se dá a partir da fermentação do SCOBY em um meio nutritivo por aproximadamente 7 a 10 dias (LEAL et al., 2018) e então é formada uma nova cultura de microrganismos em sua superfície e a kombucha é produzida (CHEN; LIU, 2000).

A CB é um material muito versátil que possui características como a biodegradabilidade, pureza e biocompatibilidade, as quais viabilizam sua aplicação em diversas áreas (KESHK, 2014). As quais incluem indústria de embalagens alimentícias, polímeros biodegradáveis, tecidos para uso biomédico e até mesmo dispositivos médicos e eletrônicos (PARK; JUNG; KHAN, 2009).

O chá verde é uma fonte importante de compostos polifenólicos (JIANG et al., 2016), também possui atividade anti-inflamatórias (FECHTNER et al., 2017), antibacterianas (MARCHESE et al., 2014) e antioxidantes (LIU et al., 2018). Sendo o chá verde muito utilizado para a produção da kombucha, pois o processo fermentação da kombucha é capaz de aumentar a biodisponibilidade de fenólicos do chá (JAYABALAN; MARIMUTHU; SWAMINATHAN, 2007).

Neste trabalho, o objetivo primordial foi a adsorção de compostos fenólicos pela celulose bacteriana, com a finalidade de empregar esse complexo resultante como uma embalagem ativa. Correlacionando com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, ao oferecer inovação na indústria de embalagens, abordando a dissociação do crescimento econômico do uso prejudicial de materiais. Além disso, responde aos ODS 12 ao promover práticas de consumo e produção sustentáveis, oferecendo uma alternativa mais ecológica aos plásticos convencionais. Ao minimizar a poluição terrestre e marinha, a pesquisa relaciona-se com os ODS 15, contribuindo para a conservação dos ecossistemas terrestres e marinhos por meio da diminuição do uso de plásticos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A cultura starter (SCOBY) foi obtida de uma fonte local na região de Curitiba, Paraná. Foi utilizada sacarose PA (Neon, Suzano, Brasil) e o chá verde foi adquirido comercialmente em uma loja de produtos naturais de Curitiba, Paraná.

A composição otimizada do meio de cultura consistiu em: 110 g/L de sacarose, 40% (v/v) de kombucha padrão, 5% (m/v) de SCOBY e 3 g/L de chá verde. Esse aprimoramento na composição foi alcançado por meio da aplicação das metodologias de Plackett-Burmann e Box-Behnken, conforme detalhado por Lima (2023). Os experimentos tiveram como padrão a água destilada autoclavada para a produção de 300 mL de meio de cultivo e a

incubação em estufa bacteriológica (Vulcan, São Paulo, Brasil) a  $28 \pm 2$  °C por 7 dias. Então, as membranas foram purificadas utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol/L à  $80 \pm 2$  °C por 2 h e lavadas com água destilada (DE SOUZA et al., 2021).

O estudo se concentrou na investigação da adsorção de fenólicos por meio da membrana de celulose pura, considerando o equilíbrio entre as concentrações iniciais de fenólicos no chá verde e as quantidades remanescentes após o processo de adsorção. A realização das isotermas de adsorção envolveu o uso de 15 mL de chá verde em várias concentrações (1 g/L, 2 g/L, 3 g/L, 4 g/L, 5 g/L, 6 g/L, 7 g/L, 8 g/L, 9 g/L, 10 g/L) e 0,680 g do adsorvente. As amostras foram mantidas em repouso, protegidas da luz, a 30°C, ao longo de um período de 2 horas.

A avaliação dos resultados da adsorção dos fenólicos foi conduzida empregando modelos isotérmicos conforme listados na Tabela 1. A incorporação dos modelos não-lineares foi realizada por meio do software OriginPro 2023 (OriginLab, Northampton, Massachusetts, Estados Unidos), e a seleção do modelo de melhor ajuste foi fundamentada nos valores do coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

**TABELA 1 - MODELOS E EQUAÇÕES UTILIZADOS PARA CALCULAR OS PARÂMETROS ISOTÉRMICOS.**

Modelo	Equação	Referência
Sips	$q_e = \frac{q_{max} \cdot K_s \cdot C_e^s}{1 + K_s \cdot C_e^s}$	(SIPS, 1948)
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	(FREUNDLICH, 1906)
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e}$	(LANGMUIR, 1918)
Redlich-Peterson	$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{(1 + a_{rp} C_e^\alpha)}$	(REDLICH; PETERSON, 1959)
Jovanovic-monolayer	$q_e = q_{max}(1 - \exp^{-K_{JM} C_e})$	(JOVANOVIĆ, 1969)
Temkin	$q_e = B_T \ln(K_T C_e)$	(TEMKIN; PYZHEV, 1940)
Toth	$q_e = \frac{q_{max} K_{TO} C_e}{[1 + (K_{TO} C_e)^t]^{1/tn}}$	(TOTH, 1971)

LEGENDA:  $q_e$ : capacidade de adsorção em equilíbrio (mg/g);  $q_{max}$ : capacidade de adsorção máxima (mg/g);  $C_e$ : concentração de equilíbrio do soluto (mg/L);  $K_s$ : constante de adsorção (mg/L)<sup>-1/n</sup>;  $s$ : parâmetro de Sips;  $K_F$ : constante de Freundlich (L/g);  $n$ : parâmetro de heterogeneidade de superfície;  $K_L$ : constante de Langmuir (L/g);  $K_{RP}$ : constante de Redlich-

Peterson (L/g);  $a_{rp}$ : parâmetro de Redlich-Peterson (L/mg);  $\alpha$ : fator exponencial de Redlich-Peterson ( $0 < \alpha \leq 1$ );  $K_{JM}$ : constante de Jovanovic-monolayer (L/mg);  $B_i$ : constante relacionada com o calor da adsorção (J/mol);  $K_T$ : constante de Temkin (L/g);  $K_{TO}$ : constante de Toth;  $n$ : fator exponencial de Toth ( $0 < n \leq 1$ ).

Para realizar os testes colorimétricos as membranas passaram pelo processo de dessorção, onde 1g das membranas é submergida em 50 mL de etanol 80%. As amostras foram mantidas em temperatura ambiente e agitadas a 45 rpm por 4 h (BURAN et al., 2014).

A determinação de compostos fenólicos totais foi realizada pelo método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (SINGLETON; ROSSI, 1965); A absorbância foi determinada em um espectrofotômetro (BEL, UV-M51 UV/VIS, MI, Itália) a 765 nm. Os cálculos foram baseados em uma curva de calibração ( $y=0,0012x + 0,0031$ ;  $R^2=0,9914$ ) obtida com ácido gálico (Sigma, São Paulo, SP, Brasil).

A determinação da atividade antioxidante foi realizada pelos métodos de 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) (BRAND-WILLIAMS; CUVÉLIER; BERSET, 1995) e ácido 2,2-azino-bis(3-etilbenzotiazolona-6-sulfônico) (ABTS) (RE et al., 1999). O método de DPPH foi determinado a 517 nm em espectrofotômetro (BEL, UV-M51 UV/VIS, MI, Itália) e os valores foram calculados a partir de uma curva de calibração ( $y=-0,0004x + 0,4305$ ;  $R^2=0,9937$ ) obtida com o padrão de Trolox (Acros Organics, Geel, Bélgica). Já o ABTS foi determinado a 734 nm em espectrofotômetro (BEL, UV-M51 UV/VIS, MI, Itália) e os valores foram calculados a partir de uma curva de calibração ( $y=-0,0002x + 0,5885$ ;  $R^2=0,994$ ) obtida com o padrão de Trolox (Acros Organics, Geel, Bélgica).

A determinação de flavonoides totais foi realizada pelo método colorimétrico de cloreto de alumínio (ZHUANG; LU; YANG, 1992). A absorbância foi determinada em um espectrofotômetro (BEL, UV-M51 UV/VIS, MI, Itália) a 510 nm. Os valores foram calculados a partir de uma curva de calibração ( $y = 0,0065x - 0,04$ ;  $R^2 = 0,9979$ ) obtida com o padrão de catequina (Sigma-Aldrich, St. Louis, USA).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 compila os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) juntamente com os parâmetros associados a cada modelo de isoterma explorado. As isotermas de adsorção desempenham um papel crucial na caracterização da interdependência entre a quantidade de adsorvente (CB) e a quantidade de adsorvato (CFT) em estado de equilíbrio, considerando uma temperatura específica (em torno de 25 °C). Os valores de  $R^2$  servem como indicadores da qualidade do ajuste proporcionado pelo modelo matemático aos dados empíricos.

Os resultados ilustram que todos os modelos se ajustaram de maneira satisfatória aos dados experimentais, evidenciando  $R^2$  superiores a 0,8. Especificamente, o modelo de Sips apresentou o ajuste mais preciso, revelando um notável coeficiente de determinação de 0,988. Logo após,

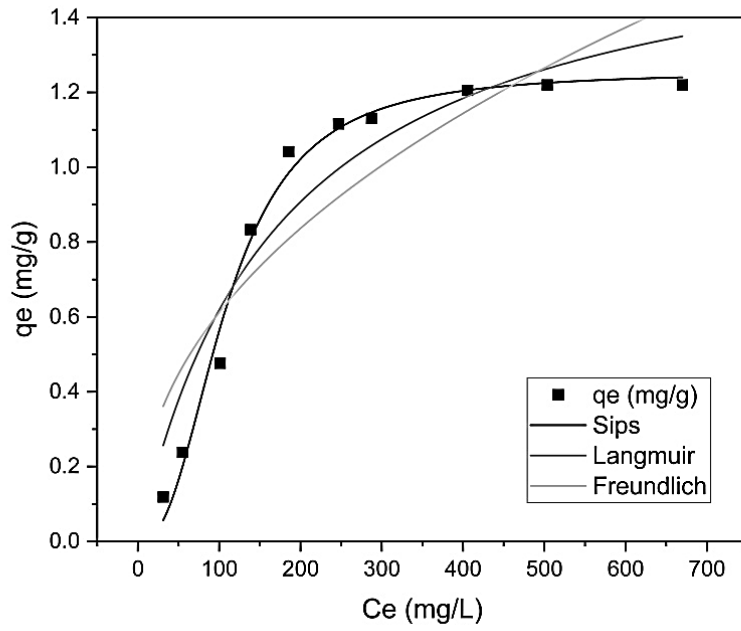
figuraram os modelos de Redlich-Peterson, Toth e Jovanovic-monolayer, com  $R^2$  excedendo 0,94. Por outro lado, os modelos de Temkin, Langmuir e Freundlich exibiram ajustes menos favoráveis, acompanhados de  $R^2$  inferiores a 0,92.

Nesse contexto, é possível concluir que a CB demonstrou uma significativa capacidade de adsorção de fenólicos. Além disso, a relação entre os componentes foi devidamente caracterizada pelos diversos modelos matemáticos considerados, ressaltando que o modelo de Sips se sobressaiu ao oferecer o melhor encaixe aos dados experimentais. As representações gráficas das curvas de diferentes modelos isotérmicos podem ser observadas nas Figuras 1 e 2.

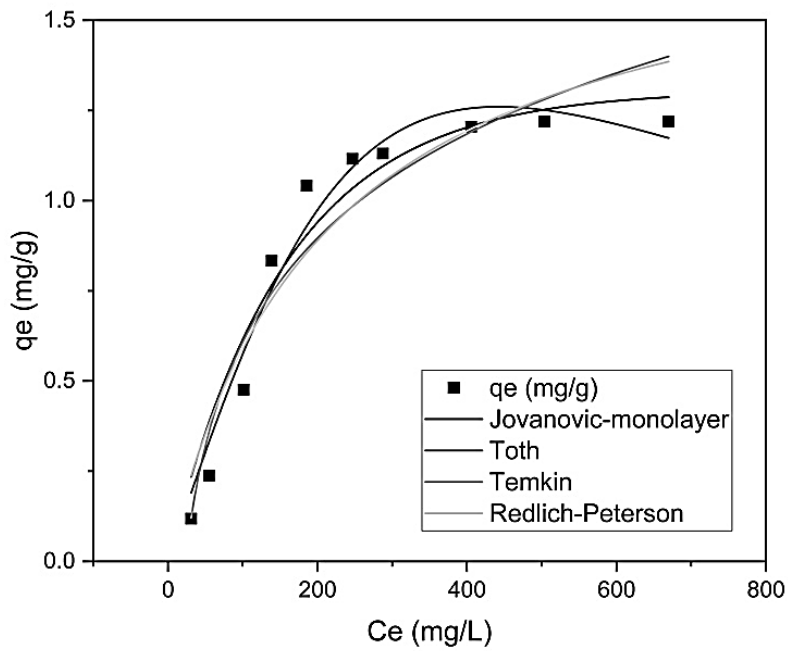
**TABELA 2 - PARÂMETROS DA ISOTERMA APLICADOS A CELULOSE BACTERIANA ADSORVIDA EM CHÁ VERDE**

Modelo	$R^2$	Parâmetros	
Sips	0,988	$K_S$	$1,122 \times 10^{-5} \pm 1,714 \times 10^{-5}$
		S	$2,430 \pm 0,331$
		$q_{max}$	$1,255 \pm 0,0377$
Redlich-Peterson	0,969	$K_{RP}$	$0,0062 \pm 7,895 \times 10^{-4}$
		$a_{RP}$	$1,391 \times 10^{-5} \pm 3,843 \times 10^{-5}$
		A	$-1,861 \pm 0,4130$
Toth	0,969	$K_{TO}$	$0,0025 \pm 3,877 \times 10^{-4}$
		tn	$1,860 \pm 0,346$
		$q_{max}$	$4,676 \pm 1,039$
Jovanovic-monolayer	0,943	$K_{JM}$	$1,305 \pm 0,0826$
		$q_{max}$	$0,0064 \pm 0,0011$
Temkin	0,919	$B_T$	$0,417 \pm 0,0438$
		$K_T$	$0,0430 \pm 0,0103$
Langmuir	0,913	$K_L$	$0,0057 \pm 0,0018$
		$q_{max}$	$1,704 \pm 0,208$
Freundlich	0,807	$K_F$	$0,0766 \pm 0,0445$
		N	$2,216 \pm 0,494$





**FIGURA 1 - CURVAS NÃO LINEARES DE SIPS, LANGMUIR E FREUNDLICH.**



## FIGURA 2 - CURVAS NÃO LINEARES DE JOVANOVIC-MONOLAYER, TOTH, TEMKIN E REDLICH-PETERSON.

Dentre as várias isotermas estudadas para a adsorção de fenólicos em CB, o modelo de Sips apresentou um valor mais elevado para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A isoterma de Sips é uma combinação dos modelos de Langmuir e Freundlich, que permite descrever a adsorção em sistemas com sítios de adsorção heterogêneos e independentes. Essa isoterma é útil quando há interações entre os sítios de adsorção (SIPS, 1948). O que indica uma melhor adequação desse modelo aos dados experimentais e uma melhor descrição do comportamento de adsorção observado. Ao obter um ajuste adequado aos dados experimentais, o modelo de Sips permite estimar parâmetros importantes, como capacidade de adsorção máxima, constante de afinidade e coeficiente de heterogeneidade. Esses parâmetros são fundamentais para compreender o mecanismo de adsorção e otimizar processos de adsorção em escala industrial.

A Tabela 3 apresenta a comparação da concentração de fenólicos totais (CFT), flavonoides totais (FT) e atividade antioxidante (AA) da celulose pura e da celulose adsorvida em meio de chá verde. A celulose pura não apresenta quantidades detectáveis de CFT, FT e AA. Porém, quando a CB foi adsorvida em chá verde, foram detectadas concentrações significativas de fenólicos totais e flavonoides totais, além de atividade antioxidante DPPH e ABTS. Sugerindo que a adsorção em meio de chá verde possibilitou a transferência dos compostos bioativos para a superfície da membrana, o que a conferiu propriedades antioxidantes.

**TABELA 3 - CONCENTRAÇÕES DE FENÓLICOS TOTAIS, FLAVONOIDES TOTAIS E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE.**

Membrana	CFT (mg/L)	FT (mg/L)	AA ( $\mu\text{M}$ )	
			DPPH	ABTS
CB-Pura	0,00 <sup>a</sup> ±0,00	0,00 <sup>a</sup> ±0,00	0,00 <sup>a</sup> ±0,00	0,00 <sup>a</sup> ±0,00
CB-CV	884,04 <sup>b</sup> ±42,92	32,31 <sup>b</sup> ±1,54	224,79 <sup>b</sup> ±10,10	963,75 <sup>b</sup> ±7,50

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: CFT: fenólicos totais; FT: flavonoides totais; AA: atividade antioxidante; CB-Pura: celulose bacteriana purificada; CB-CV: celulose bacteriana adsorvida em chá verde.

## 4. CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a celulose bacteriana pura não apresenta propriedade antioxidante, mas pode ser enriquecida com compostos antioxidantes através da adsorção em meios contendo tais compostos. Assim, a adsorção de compostos fenólicos em membranas de celulose bacteriana pode ser uma estratégia promissora para a produção de materiais com propriedades antioxidantes e de potencial aplicação em diferentes áreas, como embalagens de alimentos e produtos farmacêuticos.

## ADSORPTION OF PHENOLICS ON OPTIMISED BACTERIAL CELLULOSE

**ABSTRACT:** This study explores the adsorption of phenolic compounds on bacterial cellulose, a material derived from the symbiotic culture of bacteria and yeasts present in kombucha. Bacterial cellulose is predominantly composed of bacteria from the *Komagataibacter* genus and is produced by fermenting SCOBY in a nutrient medium. Its versatility makes it suitable for various applications due to its biodegradability, purity and biocompatibility. Through optimised production and treatment methods, bacterial cellulose has demonstrated the ability to adsorb phenolics from green tea, giving it antioxidant properties. By applying different isotherm models, it was found that the Sips model provided the best fit to the experimental data. Furthermore, the colourimetric analyses revealed that the adsorbed bacterial cellulose showed significant amounts of total phenolics ( $884.04 \pm 42.92$ ), total flavonoids ( $32.31 \pm 1.54$ ) and antioxidant activity (DPPH:  $224.79 \pm 10.10$ ; ABTS:  $963.75 \pm 7.50$ ), while pure bacterial cellulose did not exhibit these characteristics. The conclusion is that the incorporation of bioactive compounds into bacterial cellulose can give it antioxidant properties, potentially making it suitable for use in food packaging.

## REFERÊNCIAS

- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M.E.; BERSET, C. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. **LWT –Food Science and Technology**, v. 28, p. 25–30, 1995.
- BURAN, T.J. SANDHU, A.K.; LI, Z.; ROCK, C.R.; YANG, W.W.; GU, L. Adsorption/desorption characteristics and separation of anthocyanins and polyphenols from blueberries using macroporous adsorbent resins. **Journal of Food Engineering**, v. 128, p. 167–173, maio 2014.
- CHEN, C.; LIU, B.Y. Changes in major components of tea fungus metabolites during prolonged fermentation. **Journal of Applied Microbiology**, v. 89, p. 834–839, 2000.
- DE SOUZA, K.C.; TRINDADE, N.M.; de AMORIM, J.D.P.; do NASCIMENTO, H.A.; COSTA, A.F.S.; HENRIQUE, M.A.; CAETANO, V.F.; SARUBBO, L.A.; VINHAS, G.M. Kinetic study of a bacterial cellulose production by

- komagataeibacter rhaeticus using coffee grounds and sugarcane molasses. **Materials Research**, v. 24, n. 3, 22 mar. 2021.
- FECHTNER, S.; SINGH, A.; CHOURASIA, M.; AHMED, S. Molecular insights into the differences in anti-inflammatory activities of green tea catechins on IL-1 $\beta$  signaling in rheumatoid arthritis synovial fibroblasts. **Toxicology and Applied Pharmacology**, v. 329, p. 112–120, 15 ago. 2017.
- FREUNDLICH, H. M. Over the Adsorption in Solution. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 57, p. 385–471, 1906.
- JAYABALAN, R.; MARIMUTHU, S.; SWAMINATHAN, K. Changes in content of organic acids and tea polyphenols during kombucha tea fermentation. **Food Chemistry**, v. 102, n. 1, p. 392–398, 2007.
- JIANG, L.; WALCZYK, D.; McINTYRE, G.; CHAN, W.K. Cost modeling and optimization of a manufacturing system for mycelium-based biocomposite parts. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 41, n. October 2017, p. 8–20, 2016.
- JOVANOVIĆ, D.S. Physical adsorption of gases I. **Kolloid-Z.u.Z.Polymere**, v. 235, p. 1203–1213, 1969.
- KESHK, S.M.A.S. Vitamin C enhances bacterial cellulose production in *Gluconacetobacter xylinus*. **Carbohydrate Polymers**, v. 99, p. 98–100, 2014.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 1918.
- LEAL, J. M.; SUARÉZ, L.V.; JAYABALAN, R.; OROS, J.H.; ESCANLANTE-ARBUTO, A. A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites. **CYTA - Journal of Food**, v. 16, n. 1, p. 390–399, 1 jan. 2018.
- LIMA, N. F. **Desenvolvimento de celulose bacteriana: otimização do processo e avaliação das propriedades físico-químicas**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023.
- LIU, Y.; LUO, L.; LIAO, C.; CHEN, L.; WANG, J., ZENG, L. Effects of brewing conditions on the phytochemical composition, sensory qualities and antioxidant activity of green tea infusion: A study using response surface methodology. **Food Chemistry**, v. 269, p. 24–34, 15 dez. 2018.
- MARCHESE, A.; COPPO, E.; SOBOLEV, A.P.; ROSSI, D.; MANNINA, L.; DAGLIA, M. Influence of in vitro simulated gastroduodenal digestion on the antibacterial activity, metabolic profiling and polyphenols content of green tea (*Camellia sinensis*). **Food Research International**, v. 63, p. 182–191, 2014.
- PARK, J. K.; JUNG, J. Y.; KHAN, T. Bacterial cellulose. **Handbook of Hydrocolloids: Second Edition**, p. 724–739, 28 maio 2009.
- RE, R.; PELLEGRINI, N.; PROTEGGENTE, A.; PANNALA, A.; YANG, M.; RICE-EVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical

- cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**, v. 26, p. 1231–1237, 1999.
- REDLICH, O.; PETERSON, D. L. A USEFUL ADSORPTION ISOTHERM. **J. Phys. Chem.**, v. 63, n. 6, p. 1024–1024, 1959.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. JR. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic–phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, p. 144–158, 1965.
- SIPS, R. On the structure of a catalyst surface. **The Journal of Chemical Physics**, v. 16, n. 5, p. 490–495, 1948.
- TEMKIN, M. J.; PYZHEV, V. Recent Modifications to Langmuir Isotherms. **Acta Physiochim URSS**, v. 12, p. 217–225, 1940.
- TOTH, J. State equation of the solid-gas interface layers. **Academiae Scientiarum Hungaricae**, v. 69, p. 311–317, 1971.
- YAMADA, Y.; YUKPHAN, P.; VU, H.T.L.; MURAMATSU, Y.; OCHAIKUL, D.; NAKAGAWA, Y. Subdivision of the genus *Gluconacetobacter* Yamada, Hoshino and Ishikawa 1998: The proposal of *Komagatabacter* gen. nov., for strains accommodated to the *Gluconacetobacter xylinus* group in the  $\alpha$ -Proteobacteria. **Annals of Microbiology**, v. 62, n. 2, p. 849–859, jun. 2012.
- ZHUANG, X. P.; LU, Y.Y.; YANG, G.S. Extraction and determination of flavonoid in ginkgo. **Chinese Herbal Medicine**, v. 23, p. 122–124, 1992.