



Avaliação da Atividade Antimicrobiana do Óleo Essencial de Orégano (*Origanum vulgare* L.) frente a *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*

Mateus Cezarini Jacob¹; Vitor Emanuel Zilli Garcia²; Jussânia Pereira Pinto³;
Luiz Augusto de Melo⁴; Adriana de Melo⁵

1. Discente do Curso Técnico em Meio Ambiente da Etec Dr. Carolino da Motta e Silva; E-mail: mateusjacobb@gmail.com
2. Discente do Curso Técnico em Meio Ambiente da Etec Dr. Carolino da Motta e Silva; E-mail: vitorzilli825@gmail.com
3. Bióloga; Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal – UNIPINHAL; Docente da Etec Dr. Carolino da Motta e Silva - Brasil; E-mail: jussania@msn.com
4. Técnico em Agropecuária; Etec Dr. Carolino da Motta e Silva – Brasil; E-mail: luizaugustodemelo44@gmail.com
5. Doutora em Farmacologia; Docente do Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal – UNIPINHAL; Docente da Etec Dr. Carolino da Motta e Silva; Cientista Líder do Grupo de Biotecnologia e Terapia Celular Avançada do Instituto Maximize Ciência, Tecnologia e Inovação (IMCTI) - Brasil – E-mail: koymelo@yahoo.com.br; prof.adriana.melo@unipinhal.edu.br; adriana.melo@etec.sp.gov.br.

Resumo: Este estudo avaliou a atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Origanum vulgare* L. frente às bactérias *Escherichia coli* (Gram-negativa) e *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva), por meio de ensaios de microdiluição em placas de 96 poços com resazurina como marcador redox. Foram analisados três tempos de incubação (24 h, 48 h e 72 h), buscando determinar a Concentração Inibitória Mínima (MIC) e a estabilidade do efeito antimicrobiano ao longo do tempo. Os resultados evidenciaram efeito bactericida em concentrações $\geq 2,5\%$ (v/v) e efeito bacteriostático em concentrações intermediárias (0,625–1,25%), com maior eficácia frente a *S. aureus*. Observou-se que concentrações subinibitórias permitiram a recuperação parcial do crescimento bacteriano, sobretudo em *E. coli*. Os achados confirmam o potencial do óleo de orégano como alternativa natural no combate à resistência antimicrobiana, destacando sua relevância para aplicações clínicas e alimentícias, além de reforçar a necessidade de padronização metodológica em estudos futuros.

Palavras-chave: Bioatividade; Microdiluição; Fitoterápico; Sinergismo; Homeostase celular.



Evaluation of the Antimicrobial Activity of Oregano Essential Oil (*Origanum vulgare* L.) against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*

Abstract: This study evaluated the antimicrobial activity of *Origanum vulgare* L. essential oil against *Escherichia coli* (Gram-negative) and *Staphylococcus aureus* (Gram-positive), through microdilution assays in 96-well plates using resazurin as a redox indicator. Three incubation times (24 h, 48 h, and 72 h) were analyzed to determine the Minimum Inhibitory Concentration (MIC) and the stability of the antimicrobial effect over time. The results showed bactericidal effect at concentrations $\geq 2.5\%$ (v/v) and bacteriostatic effect at intermediate concentrations (0.625–1.25%), with greater efficacy against *S. aureus*. Subinhibitory concentrations allowed partial recovery of bacterial growth, especially in *E. coli*. The findings confirm the potential of oregano oil as a natural alternative in combating antimicrobial resistance, highlighting its relevance for clinical and food applications, and reinforcing the need for methodological standardization in future studies.

Keywords: Bioactivity; Microdilution; Phytotherapeutic; Synergism; Cellular homeostasis.

1. INTRODUÇÃO

O óleo essencial de orégano (*Origanum vulgare* L.) é amplamente estudado por suas propriedades biológicas, atribuídas principalmente aos fenóis carvacrol e timol, que conferem ação antimicrobiana, antioxidante e anti-inflamatória. A composição química do óleo varia conforme o quimiotipo, local de cultivo e método de extração, mas geralmente apresenta alta concentração desses compostos bioativos (Leyva-López et al., 2017). Essa variabilidade química reforça a necessidade de padronização para fins terapêuticos e experimentais, especialmente em estudos microbiológicos que utilizam técnicas de microdiluição com resazurina como marcador de viabilidade celular.

A resistência bacteriana aos antibióticos convencionais é considerada um problema global de saúde pública, estimulando a busca por alternativas naturais e eficazes (Tejada-Muñoz et al., 2024). Nesse contexto, os óleos essenciais de plantas aromáticas, como o orégano, representam uma estratégia promissora para o desenvolvimento de novos agentes antimicrobianos. Diversos estudos reportam atividade significativa frente a bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, embora com maior sensibilidade observada em *Staphylococcus aureus* (Araújo, 2021). Essa diferença é explicada pela ausência de membrana externa nas Gram-positivas, o que facilita a ação dos compostos hidrofóbicos.



Em ensaios de microdiluição, o óleo essencial de orégano apresentou MIC de 3,13 $\mu\text{L/mL}$ contra *S. aureus* e 6,25 $\mu\text{L/mL}$ contra *Bacillus cereus* (Li et al., 2025). Estudos semelhantes demonstraram que a MIC frente a *E. coli* pode variar entre 0,5 e 2,5 mg/mL, dependendo da cepa e das condições experimentais (Tao et al., 2025). Essa variabilidade reforça a importância de protocolos reprodutíveis, que considerem fatores como padronização do inóculo ($\approx 5 \times 10^5$ UFC/mL), diluições seriadas e controles adequados de solventes e reagentes.

O mecanismo de ação do óleo de orégano está associado à desorganização da membrana plasmática bacteriana, promovendo alteração da permeabilidade, perda de íons essenciais e colapso da homeostase celular (AimsPress, 2024). Além disso, há evidências de que o óleo inibe a formação de biofilmes e interfere em processos metabólicos intracelulares, ampliando sua relevância no combate a infecções crônicas (Tejada-Muñoz et al., 2024). Essa multifuncionalidade torna o orégano uma alternativa atrativa frente a cepas resistentes.

Revisões sistemáticas destacam que entre 80 e 98% da composição do óleo essencial de orégano é formada por monoterpenos fenólicos, com destaque para o carvacrol, responsável pela maior parte da atividade antimicrobiana (Araújo, 2021). A atividade antioxidante também contribui para a preservação do óleo em formulações farmacêuticas, além de potencializar sua estabilidade em sistemas biológicos. O conjunto dessas propriedades reforça seu potencial multifuncional em biotecnologia e farmacologia experimental.

A aplicação de óleos essenciais em associação a antibióticos convencionais tem mostrado resultados sinérgicos, permitindo a redução de doses de fármacos e retardando o surgimento de resistência (Tao et al., 2025). Essa integração de estratégias terapêuticas naturais e sintéticas representa um campo emergente de pesquisa, especialmente relevante em microbiologia clínica e na área de terapias avançadas. Ensaios laboratoriais controlados são fundamentais para validar essa aplicabilidade.

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe avaliar a atividade antimicrobiana do óleo essencial de orégano frente a *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* utilizando ensaio de microdiluição em placas de 96 poços, com resazurina como indicador redox. O objetivo é determinar a MIC, comparar a sensibilidade entre bactérias Gram-positivas e Gram-negativas e discutir a



aplicabilidade do óleo como alternativa ou complemento no combate à resistência antimicrobiana. Este estudo, portanto, busca contribuir para o corpo de evidências que sustenta o uso de produtos naturais na saúde e na biotecnologia.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Resistência bacteriana e alternativas naturais

A resistência antimicrobiana (RAM) é considerada uma das maiores ameaças à saúde pública mundial. Relatórios da Organização Mundial da Saúde apontam aumento progressivo das taxas de resistência bacteriana e reforçam a necessidade de novas estratégias de combate (WHO, 2021). O uso inadequado e indiscriminado de antibióticos em saúde humana, animal e na agricultura contribuiu significativamente para o surgimento de cepas multirresistentes (Ventola, 2015). Nesse cenário, cresce o interesse por produtos naturais, em especial extratos vegetais e óleos essenciais, como alternativas para conter a crise da resistência (Cowan, 1999).

2.2 Óleos essenciais como agentes antimicrobianos

Os óleos essenciais (OEs) são misturas complexas de metabólitos secundários, sobretudo terpenos e fenóis, com propriedades antimicrobianas, antioxidantes e anti-inflamatórias (Burt, 2004). Famílias botânicas como Lamiaceae, Asteraceae e Myrtaceae destacam-se pela diversidade química e pelo potencial biológico de seus óleos (Bassolé & Juliani, 2012). Pesquisas indicam que óleos como os de alecrim (*Rosmarinus officinalis*), cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*) e melaleuca (*Melaleuca alternifolia*) possuem forte atividade antimicrobiana, reforçando a aplicabilidade dos OEs tanto em microbiologia experimental quanto em aplicações farmacêuticas e alimentícias (Calo et al., 2015).



2.3 Origanum vulgare (orégano)

O *Origanum vulgare* L., pertencente à família Lamiaceae, é uma das plantas aromáticas mais estudadas pelo potencial antimicrobiano. Seu óleo essencial é rico em carvacrol, timol, p-cimeno e γ -terpineno, compostos que contribuem para sua bioatividade (Leyva-López et al., 2017). A composição química, entretanto, varia amplamente de acordo com o quimiotipo, local de cultivo e método de extração, justificando a necessidade de padronização em ensaios antimicrobianos (Gutiérrez-Grijalva et al., 2017).

2.4 Mecanismo de ação antimicrobiana do óleo de orégano

O mecanismo de ação do óleo de orégano está associado principalmente à ruptura da membrana citoplasmática bacteriana, promovendo aumento da permeabilidade, perda de íons intracelulares e colapso da homeostase (Lambert et al., 2001). Estudos demonstram que o carvacrol e o timol apresentam efeito aditivo na inibição bacteriana, explicando a potência do óleo completo (Sikkema, De Bont & Poolman, 1995). Além disso, pesquisas recentes indicam que o óleo pode inibir biofilmes bacterianos e interferir em processos metabólicos intracelulares, ampliando sua relevância contra infecções persistentes (Soltani et al., 2021).

2.5 Métodos laboratoriais para avaliação antimicrobiana

Os métodos clássicos de difusão em disco e em poço ainda são amplamente empregados, mas apresentam limitações devido à baixa difusão dos óleos em ágar (CLSI, 2018). O método de microdiluição em placas de 96 poços é considerado o padrão-ouro para determinação da Concentração Inibitória Mínima (MIC) (CLSI, 2018). O uso da resazurina como marcador redox auxilia a visualização do crescimento bacteriano, já que a coloração azul do reagente é reduzida a rosa/resorufina quando há metabolismo celular ativo (Sarker, Nahar & Kumarasamy, 2007).



2.6 Estudos prévios com óleo de orégano

Estudos têm mostrado ampla atividade antimicrobiana do óleo de orégano contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas. Li et al. (2015) observaram MIC de 3,13 $\mu\text{L/mL}$ contra *Staphylococcus aureus* e 6,25 $\mu\text{L/mL}$ contra *Bacillus cereus*. Para *Escherichia coli*, valores de MIC relatados variam de 0,5 a 2,5 mg/mL, dependendo da cepa e das condições experimentais (Tao et al., 2025). De maneira geral, bactérias Gram-positivas mostram maior sensibilidade, pela ausência da membrana externa presente em Gram-negativas, que dificulta a ação dos compostos hidrofóbicos (Araújo, 2021). Estudos recentes ainda relatam efeito sinérgico entre o óleo de orégano e antibióticos convencionais, possibilitando redução de doses farmacológicas e retardando o surgimento de resistência (Si et al., 2008).

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Avaliar a atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Origanum vulgare* L. frente a *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva) e *Escherichia coli* (Gram-negativa), empregando ensaio de microdiluição em microplacas de 96 poços com indicador redox resazurina em diferentes tempos de incubação (24 h, 48 h e 72 h), a fim de avaliar não apenas a MIC inicial, mas também a estabilidade do efeito antimicrobiano ao longo do tempo.

3.2 Específicos

- Determinar as concentrações inibitórias mínimas (MIC) do óleo essencial para cada bactéria e tempo de incubação analisado.
- Comparar a sensibilidade entre *S. aureus* e *E. coli* ao óleo essencial em função do tempo de incubação.



- Avaliar mudanças na viabilidade bacteriana ao longo de 24 h, 48 h e 72 h por meio de leitura de resazurina (visual ou espectrofotométrica).
- Analisar estatisticamente os dados obtidos utilizando ANOVA de medidas repetidas, com nível de significância $p < 0,05$.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Tipo de estudo

Trata-se de um estudo experimental, laboratorial, de caráter quantitativo, realizado com o objetivo de avaliar a atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Origanum vulgare* frente a cepas bacterianas de importância clínica.

4.2 Amostras bacterianas

Foram utilizadas cepas bacterianas de referência: *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva) e *Escherichia coli* (Gram-negativa). As culturas foram mantidas em ágar nutriente inclinado a 4 °C até a utilização. Para os ensaios, as bactérias foram reativadas em caldo nutritivo e incubadas a 37 °C por 24 horas. A suspensão bacteriana foi ajustada ao padrão 0,5 da escala de McFarland ($\approx 1,5 \times 10^8$ UFC/mL) por diluição em solução salina estéril.

4.3 Óleo essencial

O óleo essencial de *Origanum vulgare* foi adquirido em lojas de produtos naturais. Para a preparação das diluições, foram utilizados sete tubos seriados.

- Tubo 1: 1,0 mL de óleo + 1,0 mL de meio de cultura → concentração inicial de 50% (v/v).
- Tubos 2 a 7: cada tubo recebeu 1,0 mL de meio estéril e 1,0 mL transferido do tubo anterior, resultando em diluições sucessivas com fator 0,5 (Figura 1).

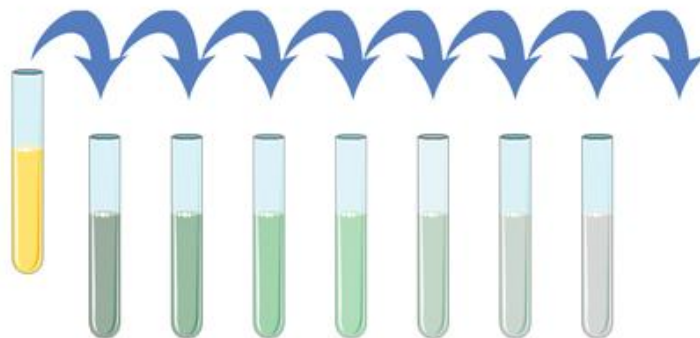


Figura 1. Diluição Seriada em Tubos. **Fonte:** <https://www.biomedicinapadiao.com.br/>

4.4 Preparo da solução de resazurina

A resazurina foi preparada na concentração de 0,01% (m/v), correspondente a 0,1 mg/mL, pela dissolução de 1 mg de pó de resazurina em 10 mL de solução tampão PBS estéril. A solução foi armazenada sob refrigeração (4 °C) e protegida da luz até o momento do uso.

4.5 Ensaio de microdiluição em placas de 96 poços

Os experimentos foram realizados em placas estéreis de 96 poços, com o seguinte preparo para cada well das colunas 1 a 7:

- 150 μ L de meio de cultura (caldo nutritivo),
- 20 μ L de suspensão bacteriana (ajustada ao padrão McFarland 0,5),
- 20 μ L da diluição do óleo correspondente,
- 10 μ L da solução de resazurina.

O volume final em cada poço foi de 200 μ L.

Foram incluídos os seguintes controles:

- Controle negativo: meio + resazurina, sem bactéria.
- Controle positivo: meio + bactéria + antibiótico de referência (amixicilina+clavulanato de potássio para *E. coli*; cloridrato de clindamicina para *S. aureus*).



- Controle de óleo: meio + óleo + resazurina, sem bactéria.

As concentrações finais testadas nos poços variaram de 5,0% → 2,5% → 1,25% → 0,625% → 0,3125% → 0,156% → 0,078% (v/v) (Tabela 1).

Tabela 1. Concentração do óleo de orégano nos tubos e nos poços da placa de 96 wells, considerando fator de diluição 0,5 (1 mL de óleo + 1 mL de meio e transferências sucessivas).

Tubo	Concentração no tubo (%)	Concentração no poço (%)
1	50,0	5,00
2	25,0	2,50
3	12,5	1,25
4	6,25	0,625
5	3,125	0,313
6	1,56	0,156
7	0,78	0,078

Fonte: Dados da Pesquisa.

4.6 Incubação e leitura

As placas foram incubadas a 37 °C, com análises visuais após 24 h, 48 h e 72 h. A escolha desses tempos de incubação teve como objetivo verificar não apenas o efeito antimicrobiano inicial, mas também sua persistência e possível reversão do crescimento bacteriano, diferenciando efeitos bactericidas dos bacteriostáticos. A viabilidade bacteriana foi determinada pela alteração de cor da resazurina, que apresenta coloração azul na forma oxidada (ausência de metabolismo bacteriano) e rosa/vermelha na forma reduzida (crescimento bacteriano ativo). Poços com coloração intermediária (violeta) foram interpretados como de crescimento parcial, indicativos de efeito bacteriostático.



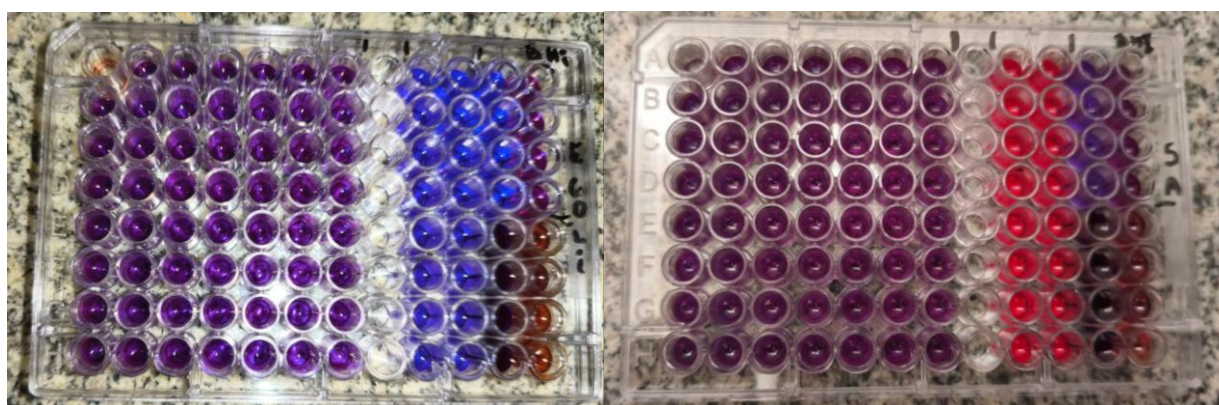
4.7 Análise estatística

Todos os experimentos foram realizados em triplicata. Os resultados foram expressos em média $\pm$ desvio padrão. Para a comparação entre os tempos de incubação (24 h, 48 h e 72 h), foi realizada ANOVA de medidas repetidas, seguida do teste de Tukey, adotando-se nível de significância de $p < 0,05$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Origanum vulgare* frente a *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* evidenciou um perfil de inibição dependente da concentração e do tempo de incubação (24 h, 48 h e 72 h).

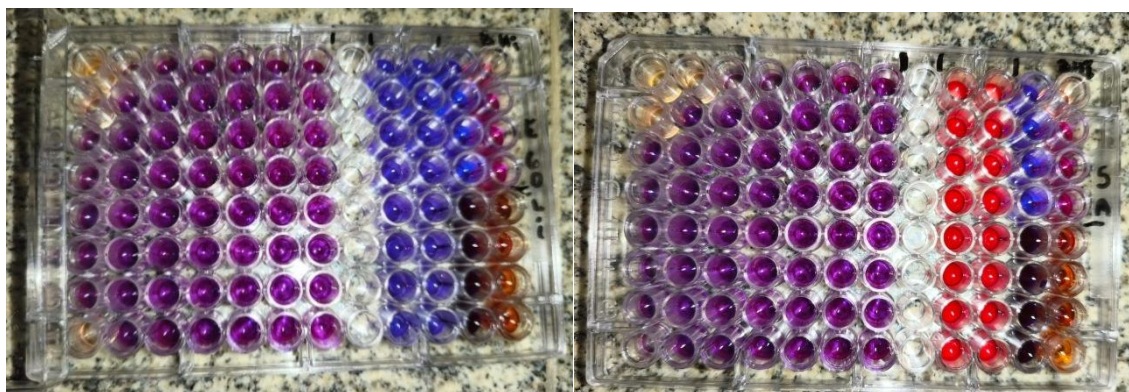
As imagens das microplacas (Figuras 2, 3 e 4) demonstram claramente a mudança de coloração da resazurina, indicando viabilidade bacteriana nos poços controles e gradiente de inibição nas diferentes concentrações do óleo.



E. coli

S. aureus

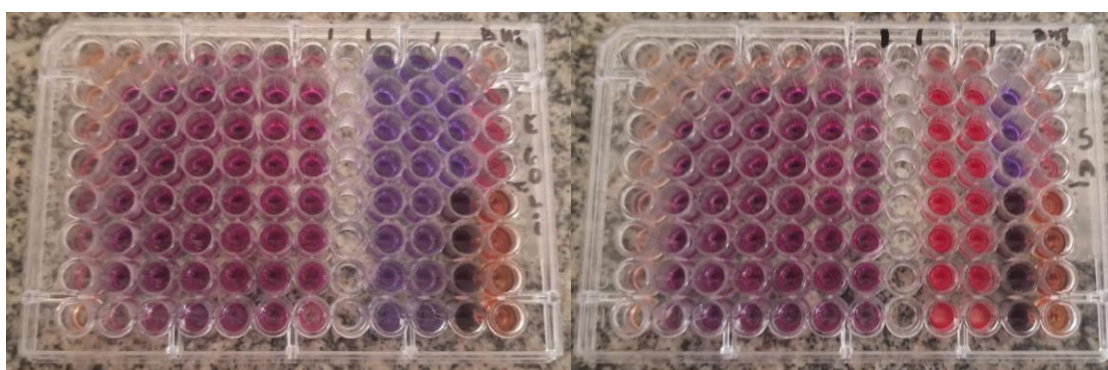
Figura 2. Placas após 24 h de incubação (*E. coli* e *S. aureus*). **Fonte:** Acervo dos autores.



E. coli

S. aureus

Figura 3. Placas após 48 h de incubação (*E. coli* e *S. aureus*). **Fonte:** Acervo dos autores.



E. coli

S. aureus

Figura 4. Placas após 72 h de incubação (*E. coli* e *S. aureus*). **Fonte:** Acervo dos autores.

Nos controles bacterianos (coluna 12), observou-se coloração rosa/vermelha em todos os tempos de incubação, confirmando crescimento bacteriano e a validade experimental. Já os controles negativos e de óleo permaneceram azulados, descartando interferência da resazurina ou do meio.

Nas colunas correspondentes às maiores concentrações do óleo (5,0% e 2,5% v/v), a coloração manteve-se azul/roxa até 72 h, sugerindo efeito bactericida contra ambas as espécies testadas. Em concentrações intermediárias (1,25% e 0,625% v/v), houve coloração violeta aos 24 h e 48 h, evoluindo para tons mais rosados aos 72 h, indicando efeito bacteriostático, com inibição inicial seguida de recuperação bacteriana parcial. Nas concentrações mais baixas ($\leq 0,312\%$), os poços foram corados em rosa já em 24 h, confirmando ausência de inibição (Tabela 2).



Tabela 2. Avaliação da atividade antimicrobiana do óleo essencial de *Origanum vulgare* frente a *E. coli* e *S. aureus* em diferentes concentrações e tempos de incubação.

Concentração (%)	<i>E. coli</i> 24h	<i>E. coli</i> 48h	<i>E. coli</i> 72h	<i>S. aureus</i> 24h	<i>S. aureus</i> 48h	<i>S. aureus</i> 72h
5,0	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul
2,5	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul
1,25	Roxo	Roxo	Roxo/Rosa	Roxo	Roxo	Roxo/Rosa
0,625	Roxo/Rosa	Roxo/Rosa	Rosa	Roxo/Rosa	Roxo/Rosa	Rosa
0,313	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa
0,156	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa
0,078	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa

Fonte: Dados da Pesquisa.

Os resultados obtidos confirmam que o óleo essencial de *Origanum vulgare* apresenta atividade antimicrobiana relevante contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas. Entretanto, a eficácia foi mais consistente contra *Staphylococcus aureus*, o que pode ser explicado pela estrutura celular mais simples das Gram-positivas, que carecem da membrana externa lipopolissacarídica típica das Gram-negativas, a qual funciona como barreira adicional à entrada de compostos hidrofóbicos (Sikkema, De Bont e Poolman, 1995).

A observação de poços com coloração violeta em concentrações intermediárias sugere ação bacteriostática do óleo, com inibição parcial do metabolismo bacteriano e posterior recuperação, sobretudo em *E. coli*. Esse comportamento está em consonância com Lambert et al. (2001), que reportaram ação dose-dependente de carvacrol e timol, com possibilidade de retomada do crescimento bacteriano em concentrações subinibitórias.

Os valores de MIC encontrados neste estudo ($\approx 1,25\%$ v/v) são comparáveis aos relatados por Li et al. (2015), que observaram inibição de *S. aureus* em concentrações próximas a $1,25 \mu\text{L/mL}$ em ensaios de microdiluição. Tao et al. (2025) também destacaram que diferentes quimiotipos de orégano apresentam MICs variando de 0,5 a 2,5%, reforçando a influência de fatores ambientais e metodológicos.



A manutenção da inibição em concentrações altas até 72 h indica potencial efeito bactericida, enquanto a perda de inibição em concentrações intermediárias confirma atividade predominantemente bacteriostática nessas condições. Tal dualidade é relevante, pois sugere que o óleo de orégano pode ser utilizado como adjuvante em formulações antimicrobianas, especialmente quando associado a antibióticos convencionais, relação já documentada em estudos de sinergismo (Si et al., 2008).

Assim, os resultados deste trabalho reforçam a importância do óleo essencial de *Origanum vulgare* como alternativa promissora no enfrentamento da resistência antimicrobiana, alinhando-se a estudos prévios que comprovam sua eficácia e sugerem aplicações potenciais em áreas clínica e alimentar (Burt, 2004; Bassolé e Juliani, 2012).

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que o óleo essencial de *Origanum vulgare* apresenta atividade antimicrobiana significativa frente a cepas de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, evidenciada pela alteração da coloração da resazurina em ensaios de microdiluição em placas de 96 poços.

A Concentração Inibitória Mínima (MIC) observada para ambas as espécies foi de aproximadamente 1,25% v/v, com maior estabilidade de inibição para *S. aureus*. O óleo apresentou efeito bactericida nas concentrações mais altas ($\geq 2,5\%$) e efeito predominantemente bacteriostático nas concentrações intermediárias, especialmente frente a *E. coli*, onde foi observada recuperação parcial do crescimento bacteriano após 72 horas de incubação.

Esses resultados corroboram achados prévios da literatura e reforçam a relevância do óleo de orégano como uma alternativa natural promissora no enfrentamento da resistência antimicrobiana. Apesar da eficácia observada, é importante destacar que fatores como quimiotipo do óleo, condições experimentais e composição bacteriana podem influenciar os valores de MIC, o que ressalta a necessidade de padronização metodológica e de novos estudos.

Conclui-se que o óleo de *Origanum vulgare* pode atuar como agente antimicrobiano natural, com potencial aplicação tanto na área de saúde quanto na indústria alimentícia, seja de forma isolada ou em associação a antibióticos convencionais. Investigações futuras devem contemplar análises de



sinergismo, toxicidade e mecanismos de ação detalhados, de forma a ampliar as perspectivas de utilização segura e eficaz desse fitoterápico.

REFERÊNCIAS

AIMS PRESS. Antimicrobial properties of oregano oil and carvacrol. *AIMS Biophysics*, v. 11, n. 2, 2024. Disponível em: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/biophy.2024027>. Acesso em: 01 set. 2025.

ARAÚJO, W. L. Atividade antimicrobiana de óleos essenciais. *Revista de Ciências Farmacêuticas*, v. 42, n. 2, p. 55–64, 2021. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rcf/article/view/2021>. Acesso em: 01 set. 2025.

BASSOLÉ, I. H. N.; JULIANI, H. R. Essential oils in combination and their antimicrobial properties. *Molecules*, v. 17, n. 4, p. 3989–4006, 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/17/4/3989>. Acesso em: 01 set. 2025.

BURT, S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods – a review. *International Journal of Food Microbiology*, v. 94, n. 3, p. 223–253, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>. Acesso em: 01 set. 2025.

CALO, J. R. et al. Essential oils as antimicrobials in food systems – a review. *Food Control*, v. 54, p. 111–119, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.12.040>. Acesso em: 01 set. 2025.

CLSI – Clinical and Laboratory Standards Institute. *Performance standards for antimicrobial susceptibility testing: M100*. 28. ed. Wayne, PA: CLSI, 2018. Disponível em: <https://clsi.org/standards/products/microbiology/documents/m100/>. Acesso em: 01 set. 2025.

COWAN, M. M. Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, v. 12, n. 4, p. 564–582, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/CMR.12.4.564>. Acesso em: 01 set. 2025.

GUTIÉRREZ-GRIJALVA, E. P. et al. Flavonoids and phenolic acids from oregano: occurrence, biological activity and health benefits. *Molecules*, v. 22, n. 2, p. 1–27, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/22/2/327>. Acesso em: 01 set. 2025.



LAMBERT, R. J. W. et al. A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol. *Journal of Applied Microbiology*, v. 91, n. 3, p. 453–462, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01392.x>. Acesso em: 01 set. 2025.

LEYVA-LÓPEZ, N. et al. Oregano: phytochemistry, pharmacology, and food preservation. *Food Reviews International*, v. 33, n. 4, p. 431–452, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1196487>. Acesso em: 01 set. 2025.

LI, X. et al. Antimicrobial activity of oregano essential oil against Gram-positive bacteria. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, p. 123–134, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00036>. Acesso em: 01 set. 2025.

SARKER, S. D.; NAHAR, L.; KUMARASAMY, Y. Microtitre plate-based antibacterial assay incorporating resazurin as an indicator of cell growth. *Methods*, v. 42, p. 321–324, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2007.01.006>. Acesso em: 01 set. 2025.

SIKKEMA, J.; DE BONT, J. A.; POOLMAN, B. Mechanisms of membrane toxicity of hydrocarbons. *Microbiological Reviews*, v. 59, n. 2, p. 201–222, 1995. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC239358/>. Acesso em: 01 set. 2025.

SI, H. et al. Antibacterial effect of oregano essential oil alone and in combination with antibiotics. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, v. 53, p. 190–198, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1574-695X.2008.00420.x>. Acesso em: 01 set. 2025.

SOLTANI, S. et al. Mechanisms of antimicrobial action of carvacrol and thymol against pathogens. *AMB Express*, v. 11, n. 1, p. 154–165, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01304-9>. Acesso em: 01 set. 2025.

TAO, N. et al. Comparative antimicrobial effects of white and purple oregano oils. *Phytomedicine*, v. 115, p. 152–167, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2025.155175>. Acesso em: 01 set. 2025.

TEJADA-MUÑOZ, A. et al. Antimicrobial activity of oregano oil and carvacrol: mechanisms and applications. *Frontiers in Microbiology*, v. 15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1352467>. Acesso em: 01 set. 2025.

VENTOLA, C. L. The antibiotic resistance crisis: part 1: causes and threats. *Pharmacy and Therapeutics*, v. 40, n. 4, p. 277–283, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4378521/>. Acesso em: 01 set. 2025.



PhD Scientific Review

ISSN 2676 – 0444

WHO – World Health Organization. *Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report 2021*. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240027336>. Acesso em: 01 set. 2025.