

# Embalagens ativas com nanocompósitos e antimicrobianos: uma revisão de literatura

## Autoria:

**Pâmella Riavda Martins Nascimento**

*Engenheira de Alimentos*

**Isabella de Cássia**

*Estudante de Medicina Veterinária do IFMG*

**Bárbara Barros Silveira**

*Estudante de Medicina Veterinária do IFMG*

**Larissa Nágila Novais**

*Estudante de Medicina Veterinária do IFMG*

**Káren Ariane Moreira Santos**

*Estudante de Medicina Veterinária do IFMG*

**Fernanda Gonçalves Carlos**

*Técnico Administrativo em Educação (TAE) do IFMG campus Bambuí*

**Fernanda Morcatti Coura**

*Docente do IFMG*

## Resumo

A demanda pelo desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para a redução do desperdício, melhoria da conservação e segurança dos alimentos sempre foi pauta de pesquisa na indústria de alimentos. Considerando que 77 milhões de pessoas são afetadas por doenças transmitidas por alimentos (DTA's) e 9 mil morrem pelo mesmo motivo anualmente nas Américas, uma das alternativas para mitigar esses problemas seria a criação e utilização de embalagens ativas antimicrobianas juntamente com a aplicação de nanotecnologia, que podem reduzir os riscos de contaminação, aumentar a vida útil do alimento, diminuir as alterações deteriorantes nos alimentos e aumentar a comestibilidade das embalagens. A pesquisa teve como objetivo revisar a aplicabilidade da nanotecnologia em embalagens ativas antimicrobianas, buscando prolongar a validade dos alimentos e melhorar sua qualidade. A revisão abordou nanocompósitos de metais, argilas, óleos essenciais e celulose em embalagens antimicrobianas. Conclui-se que essas embalagens possuem potencial para preservar produtos alimentícios, inibindo a deterioração microbiológica e aumentando a segurabilidade dos alimentos. No entanto, existem fatores limitantes para a produção e utilização como: a falta de pesquisas no Brasil acerca do tema e a dificuldade da produção em escala industrial, considerando-se que os estudos e suas aplicabilidades são de intuito laboratorial, além do receio e resistência do consumidor.

**Palavras-chave:** Nanotecnologia. Patógenos. Segurança alimentar.

## Como citar este capítulo:

NASCIMENTO, Pâmella Riavda Martins *et al.* Embalagens ativas com nanocompósitos e antimicrobianos: uma revisão de literatura. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). **Fundamentos e pesquisas em Ciências Ambientais e Agrárias.**

## INTRODUÇÃO

O setor alimentício enfrenta muitos desafios, como estender a vida útil dos alimentos, reduzir o seu desperdício e deterioração, avaliar a segurança do produto e melhorar a qualidade dos alimentos. Todos os anos são descartados um terço dos alimentos produzidos para consumo humano. Além disso, pesquisas realizadas pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), comprovam que anualmente 77 milhões de pessoas são afetadas por doenças transmitidas por alimentos (DTA's) causadas por bactérias, vírus e parasitas, resultando na morte de 9 mil pessoas nas Américas. As bactérias patogênicas, como *Salmonella*, *Campylobacter* spp. e *Escherichia coli*, são responsáveis pela maioria dos surtos.

Esses problemas resultam em déficit econômico e aumento de despesas médicas. Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para que esse desperdício seja reduzido e garantida a segurança dos alimentos (MUSTAFA; ANDREESCU, 2020). Uma das estratégias possíveis para a redução da deterioração é a utilização de embalagens ativas com aplicação de nanotecnologia, aumentando a vida útil do produto.

A aplicação e efetividade das boas práticas de fabricação na indústria, confere a segurança do alimento, inibindo a contaminação por patógenos. Diferentes fatores como a manipulação inadequada, binômio temperatura e tempo e contaminação cruzada são causadores de surtos e infecções de origem alimentar (PICHLER; ZIEGLER; ALDRIAN, 2014). Os alimentos de origem animal e de preparo coletivo são os responsáveis por grande parte dos surtos, onde a contaminação do alimento pode ocorrer em toda cadeia alimentar, desde o plantio até o consumo pelo ser humano, e os patógenos que se destacam são *Salmonella* spp, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Shigella* spp, *Bacillus cereus* e *Clostridium perfringens* (BRASIL, 2010).

Partindo do pressuposto o uso de embalagens seguido de boas práticas de fabricação na indústria de alimentos, as mesmas são essenciais para assegurar a preservação dos alimentos durante toda sua vigência. Ela é responsável por garantir que o empenho aplicado na fabricação de um alimento de qualidade seja respeitado e mantido durante o transporte, distribuição, comercialização e chegada ao consumidor, pronto para o consumo. Para que isso ocorra, é importante que a embalagem seja estabelecida de acordo com o alimento e seu processo, protegendo-o de fatores como

oxigênio, luz, umidade, absorção de aromas externos, perda de nutrientes e fragrâncias e contaminação microbiológica, possibilitando que ele atinja a esperada vida útil (PADULA; ITO, 2006).

A nanotecnologia tem como foco a manipulação, caracterização e fabricação de estruturas biológicas e não biológicas em escala nanométrica (1 nm a 100 nm), com propriedades funcionais únicas nessa escala e que não são possíveis de serem alcançadas na escala de macro. Os nanocompósitos são caracterizados por materiais híbridos, com dimensões nanométricas, e sua eficiência decorre das diferentes interações entre os materiais compostos e os nanocompósitos, pela elevada área superficial das nanopartículas, e forte interação entre a matriz no meio inserido (FERREIRA; RANGEL, 2009).

A busca pela utilização de nanopartículas tem aumentado nos últimos anos com enfoque no melhoramento do desempenho e propriedades das embalagens. A finalidade da utilização de nanocompostos se dá pelo melhoramento físico das embalagens, às quais são incorporados nanocompostos com propriedades nutricionais e/ou antimicrobianas, e nanosensores, que são empregados em embalagens ativas (CHAUDHRY e CASTLE, 2011). No estudo de Chaudry e Castle (2011) foi demonstrado que as partículas de tamanho nanométrico colaboram para o melhoramento das propriedades das embalagens com relação a flexibilidade, estabilidade, temperatura, umidade, durabilidade e barreira a gases. Além disso, os nanomateriais incorporados em embalagens ativas podem ter propriedades antimicrobianas e/ou funcionais. Alguns exemplos de nanocompostos são as nanopartículas metálicas, nanoargilas, nanopartículas com óleos essenciais, nanofibras (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Os métodos de aplicação de nanotecnologia podem ser feitos por nanorevestimento, nanolaminação e nanoargilas. Cada método é definido pela especificação do resultado, levando em consideração as múltiplas funções e propriedades que as nanopartículas apresentam. É ideal que se tenha um conhecimento prévio sobre a utilização de cada uma delas para que o estudo seja eficaz (PRIMOŽIČ; KNEZ; LEITGEB, 2021).

Apesar do grande potencial, as embalagens ativas com nanocompósitos antimicrobianos para alimentos não são muito utilizadas em grande escala até o momento. Uma das principais razões para o baixo uso dessa tecnologia é o custo relativamente alto dos materiais necessários para produzir as embalagens. Além disso, a eficácia das embalagens ativas antimicrobianas pode variar com o tipo de microrganismo e as condições de armazenamento. No entanto, o potencial dessa tecnologia é inegável

e, com o aumento da demanda por produtos alimentícios com maior qualidade e mais seguros, é provável que veremos um crescimento no uso das embalagens ativas nos próximos anos (CHAUDHRY e CASTLE, 2011).

Existem diferentes tecnologias utilizadas na produção de embalagens ativas, como embalagens antimicrobianas (testadas em carne, peixe, queijo, frutas secas e produtos de panificação), atmosfera modificada, absorvedores de oxigênio (testadas em produtos de panificação, café, chá, leite em pó, queijos, produtos cárneos), de dióxido de carbono (testadas em café torrado, produtos desidratados), de odor estranho, de umidade (testadas em frutas, vegetais, produtos congelados e de panificação) e de etileno (testadas em frutas e hortaliças), emissores de etanol (testadas em produtos de panificação, peixe), emissores de dióxido de carbono (testadas em frutas e hortaliças, peixes, carnes e aves) e enxofre, sistemas de retirada de pressão, entre outras (ALMEIDA, 2010).

Assim, o objetivo geral do estudo foi realizar uma revisão de literatura, sobre a utilização de nanocompostos com atividade antimicrobiana utilizadas em alimentos, com enfoque nos resultados aplicados na diminuição e na eliminação dos principais microrganismos causadores de doenças transmitidas por alimentos.

Foi realizado o levantamento de artigos das principais plataformas científicas: Scopus, PubMed, Google Acadêmico, Scielo, Sciendirect e Periódicos da Capes. As palavras chaves utilizadas nas bases foram: active packaging (embalagem ativa), antimicrobial packaging (embalagem antimicrobiana), nanotechnology (nanotecnologia), patógenos (pathogen), com limitação de publicações entre os anos de 2015 e 2022.

Os trabalhos foram selecionados a partir de uma leitura prévia do resumo e se enquadram no tema da revisão: embalagens ativas antimicrobianas produzidas com nanocompósitos com ação contra microrganismos causadores de DTAs.

## VISÃO GERAL DA LITERATURA: NANOTECNOLOGIA E EMBALAGENS ATIVAS ANTIMICROBIANAS

A busca pelos artigos nas bases citadas, após a seleção dos mesmos, resultou em 37 trabalhos selecionados, onde 19 citam aplicações *in vitro* ou em alimentos e as demais discussões sobre as nanotecnologias aplicadas. Estes tiveram como objetivo estudar a aplicação da nanotecnologia (a citar: nanopartículas de metais, nanopartículas de argila, nanoemulsões de óleos essenciais e nanofibras de celulose) em embalagens ativas antimicrobianas, com o intuito de reduzir ou inativar o crescimento microbiano de

microrganismos patogênicos que causam a deterioração de alimentos e doenças alimentares. Além disso, também é discutido na revisão a toxicidade que elas podem ter para o ser humano.

Quadro 1. Resumo dos trabalhos selecionados para a revisão de literatura.

Autor	Ano	Patógenos	Nanopartícula/Nanoemulsão/ Nanofibra	Aplicação
Abreu <i>et al.</i>	2016	Bactérias mesófilas e enterobactérias	Nanopartícula de prata	Filmes poliméricos
Araújo	2019	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de prata	Filmes de polietileno de baixa densidade com zeólita
Bourakadi <i>et al.</i>	2019	<i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de argila	Filmes de quitosana e álcool polivinílico
Brito <i>et al.</i>	2019	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de prata	Filmes de polietileno de baixa densidade
Capezello <i>et al.</i>	2018	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de óxido de zinco	Filmes biodegradáveis
Celestino	2021	<i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de prata Nanopartícula de óxido de zinco	Filmes de polietileno de baixa densidade e polietileno linear de baixa densidade
Chenwei <i>et al.</i>	2018	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de argila	Filmes com polifenóis de chá
Esmazadeh <i>et al.</i>	2016	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Enterobacter aerogenes</i>	Nanopartícula de óxido de zinco	Filmes de polietileno de baixa densidade
Ferreira	2021	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartículas de prata	Filmes poliméricos com extratos de plantas
Fonseca	2020	<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Salmonella Typhimurium</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanofibra a base de amido de milho e batata	Filmes com incorporação de óleo essencial de carvacrol
Hakeem <i>et al.</i>	2020	<i>Campylobacter jejuni</i>	Nanopartícula de óxido de zinco	Almofada absorvente
Krepker <i>et al.</i>	2017	<i>Escherichia coli</i>	Nanoemulsões de óleos essenciais ( carvacrol e timol)	Filmes poliméricos
Lorevice	2019	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Salmonella Typhimurium</i> , <i>Enterococcus faecalis</i>	Nanoemulsões de óleos essenciais de alecrim e alho	Filmes de pectina
Muller	2019	<i>Salmonella enteritidis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartículas de óxido de zinco	Filmes de polietileno linear de baixa densidade com camadas de amido e quitosana
Oliveira	2022	<i>Escherichia coli</i>	Nanopartículas de argila	Filmes de poli (hidroxibutirato-co-hidroxivalerato); Óleo essencial de orégano e manjeriço
Raeisi <i>et al.</i>	2021	<i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Bacillus cereus</i>	Nanofibra de proteína isolada de soja/gelatina	Filmes com incorporação de óleos essenciais de <i>Zataria multiflora</i> e <i>Cinnamom zeylanicum</i>

Quadro 1. Continuação.

Autor	Ano	Patógenos	Nanopartícula/Nanoemulsão/ Nanofibra	Aplicação
Shao <i>et al.</i>	2021	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> e <i>Aeromonas caviae</i>	Nanopartícula de óxido de zinco Nanopartícula de dióxido de silício (SiO) Nanopartícula de óxido de cobre ( CuO)	Filmes nanacompostos
Souza	2018	<i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Salmonella enterica</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Nanopartícula de argila	Filmes a base de quitosana com extratos de óleos essenciais de alecrim e gengibre
Yu <i>et al.</i>	2017	<i>Escherichia coli</i>	Nanofibra de celulose, amido de milho e quitosana	Filmes biopoliméricos

Um dos principais motivadores para o uso de embalagens ativas é a demanda cada vez maior de uma embalagem que possa preservar o alimento por um período maior, sem perder suas propriedades e características. São múltiplas as possibilidades e os métodos a serem utilizados para alcançar tais objetivos, como a aplicação de nanoestruturas que detectam aditivos, toxinas, resíduos e microrganismos patogênicos nos produtos alimentícios (RUMAYOR *et al.*, 2005).

### Nanopartícula de prata

Existem diferentes estudos publicados sobre a utilização de nanopartículas de prata, e sua aplicação em embalagens é consideravelmente promissora no controle de patógenos em alimentos.

De Abreu *et al.* (2016) avaliaram nanopartículas de prata incorporadas em embalagens para petiscos de atum, a fim de analisar a sua eficácia antimicrobiana. As amostras foram armazenadas e retiradas em diferentes dias, em embalagens que liberaram nanopartículas de prata, e foi possível concluir que houve um retardo no crescimento de bactérias mesófilas nos primeiros dias, e não houve crescimento de enterobactérias (bactérias mesófilas e enterobactérias são os principais microrganismos que causam deterioração de peixes).

Brito *et al.* (2019) analisaram os efeitos antimicrobianos da adição de nanopartículas de prata em filmes de polietileno de baixa densidade *in vitro*. Além de encontrarem eficácia contra *E. coli*, também foi possível notar êxito contra *Staphylococcus aureus*.

Araújo (2019) sintetizou filmes de polietileno de baixa densidade com zeólita com nanopartículas de prata nas concentrações de 1%, 5% e 10%, com aplicação *in vitro*. As concentrações de 5% e 10% foram as mais efetivas contra as bactérias *E. coli* e *S. aureus*.

Ferreira (2021) encontrou ação antimicrobiana com o uso de nanopartículas de prata incorporadas a quatro tipos de extratos de plantas, pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart.), umbaúba (*Cecropia hololeuca* Miq.), algodão do mangue (*Hibiscus pernambucensis* Arruda) e jurema preta (*Mimosa hostilis* Poir), a partir de testes de concentração inibitória mínima (CIM). No estudo, os extratos testados tiveram ação inibitória contra o crescimento microbiano de *E. coli* e *S. aureus*.

A utilização de nanopartículas de prata como atividade antimicrobiana em nanocompostos se dá ao fato do tamanho da partícula, concentração e liberação delas no meio inserido, sendo capazes de modificar a permeabilidade da membrana e da parede celular dos microrganismos, promovendo sua ruptura ou morte (AZIZI-LALABADI; GARAVAND; JAFARI, 2021).

### Nanopartícula de óxido de zinco

As nanopartículas de óxido de zinco possuem propriedades semelhantes às nanopartículas de prata, como a atividade antimicrobiana, devido a oxidação fotocatalítica, ruptura das membranas e dissolução de íons metálicos. A atividade dessas nanopartículas depende da sua forma, tamanho e propriedades da interface inserida (ZHANG *et al.*, 2023) e alguns trabalhos citados a seguir demonstram suas diversas aplicabilidades.

Capelezzo *et al.* (2018) analisaram a atividade antimicrobiana por meio da utilização de filmes biodegradáveis aditivados com compostos à base de zinco. Em específico foram utilizadas nanopartículas de óxido de zinco e micropartículas de vidro embebidas com zinco adicionadas ao filme biodegradável Ecoflex, e testadas a atividade contra *S. aureus* e *E. coli*. Os resultados mostraram que os filmes acrescidos com nanopartículas e micropartículas de óxido de zinco foram eficazes na inibição e/ou morte dos microrganismos citados, nas concentrações dos microrganismos a  $10^4$  UFC.mL<sup>-1</sup> após 24 h de contato *in vitro*.

No estudo de Esmailzadeh *et al.* (2016) foi analisado o efeito antimicrobiano contra *Bacillus subtilis* e *Enterobacter aerogenes* na utilização de filmes de polietileno de baixa densidade (PEBD) incorporadas com nanopartículas de óxido de zinco (ZnO), que continham 2% e 4 % de nanopartículas de ZnO, as mesmas foram sintetizadas pelo

método do sal fundido fácil e caracterizadas por difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O crescimento de microrganismos foi diminuído em ambas as concentrações, porém, o filme de concentração 4% obteve maior efeito antimicrobiano contra as duas espécies bacterianas testadas. A pesquisa reforça que quanto maior a concentração de nanopartículas maior o seu efeito antimicrobiano, porém, existem fatores limitantes neste aumento, como questões de segurança e propriedades mecânicas inadequadas nas concentrações mais altas.

Hakeem *et al.* (2020) incorporaram nanopartículas de óxido de zinco (ZnO NPs) a embalagens de carne crua de frango para o controle do microrganismo *Campylobacter jejuni*. Primeiro foi identificado a concentração inibitória da nanopartícula de zinco necessária contra o *C. jejuni* e depois foram desenvolvidas almofadas absorventes 2D funcionalizadas por meio de uma técnica de imersão assistida por ultrassom, sendo estas colocadas sob a carne de frango crua. Após 3 dias de armazenamento, as almofadas absorventes funcionalizadas com ZnO NPs reduziram a carga microbiológica de *C. jejuni* para níveis indetectáveis, mantendo a carne livre de contaminação durante o prazo de validade do produto. Como vantagem, o trabalho destaca que não houve migração das nanopartículas para o alimento.

Celestino (2021) desenvolveu filmes de polietileno de baixa densidade e polietileno linear de baixa densidade, com adição dos agentes microbianos Colorbac (baseado em nanopartículas de prata) e Microbac (baseado em nanopartículas de óxido de zinco). Testou sua utilização na elaboração de embalagens ativas para pães e verificou uma redução da população microbiana em torno de 91% para o filme com nanopartículas de prata (Ag) e de 88% para o filme com nanopartícula de óxido de zinco (ZnO), comprovando que os filmes incorporados com nanopartículas dificultaram e retardaram o crescimento microbiano na superfície do produto, com diminuição na contagem de fungos na superfície dos pães, além da efetiva redução da atividade antimicrobiana contra *S. aureus*.

Müller (2019) desenvolveu filmes de polietileno linear de baixa densidade incorporados com nanopartículas de óxido de zinco, adicionando camadas de amido ou quitosana, por meio de duas diferentes técnicas: aspersão das nanopartículas parcialmente fundidas e pela aplicação do plasma frio de ar atmosférico. A maior efetividade antibacteriana foi encontrada nos filmes com camadas de quitosana, que foi capaz de inativar totalmente os microrganismos *Salmonella Enteritidis* e *S. aureus*, devido às propriedades antimicrobianas que a quitosana apresenta, possuindo interações

com a membrana do microrganismo, alterando a permeabilidade da mesma e comprometendo o metabolismo, podendo, em alguns casos, levar à lise da célula.

Foi realizado um estudo com a utilização de nanopartículas de óxidos metálicos *in vitro* para verificar a diminuição do crescimento microbiano e vida útil do camarão *Penaeus vannamei* cru e inoculado. SHAO *et al.* (2021) utilizaram filmes nanocompostos contendo nanopartículas de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de zinco (ZnO) e óxido de cobre (CuO), e em diferentes combinações SiOZnO, SiO-CuO, ZnO-CuO, suportados por 4A zeólita (4Az). Os autores avaliaram o potencial antimicrobiano para os microrganismos *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas fluorescens*, *Vibrio parahaemolyticus* e *Aeromonas caviae*, medindo a zona de inibição ao redor dos discos inoculados. De modo geral, os nanocompósitos contendo nanopartículas (isoladas ou combinadas) reduziram de forma significativa a atividade microbiana dos microrganismos citados, porém, o tratamento com a combinação de SiO-ZnO foi o mais eficiente.

### Aplicabilidade das nanopartículas de metais

Baseado nos trabalhos supracitados, demonstra-se a aplicabilidade na utilização de nanopartículas de metais nos alimentos, desde a diminuição até a eliminação de microrganismos patogênicos e que causam DTA's, em especial *S. aureus* e *E. coli*. A variação da eficiência está relacionada às concentrações dos nanocompósitos utilizadas, pelo material aplicado, pelo microrganismo testado e a combinação com outros nanocompostos.

As nanopartículas de metais são as mais promissoras, devido a vantagens como a facilidade de incorporação a diferentes materiais, como exemplo o plástico e têxteis, e sua atividade antimicrobiana, sendo um diferencial comparado aos antimicrobianos tradicionais que não possuem a mesma estabilidade (ZHOU, *et al.* 2011). As nanopartículas de prata, óxido de zinco, zinco, titânio e cobre são as mais utilizadas com potencial antimicrobiano. As nanopartículas de prata além de promover boa estabilidade e propriedades de incorporação a matrizes poliméricas, possuem baixa toxicidade para as células do corpo, e são aplicadas como um importante agente contra microrganismos como bactérias (Gram-negativas e Gram-positivas), fungos, leveduras e vírus (AZIZI-LALABADI; GARAVAND; JAFARI, 2021).

Em contrapartida, as nanopartículas de metais como óxido de cobre (CuO), óxido de níquel (NiO), óxido de zinco (ZnO), e trióxido de antimônio ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) frente a cepas da grande maioria dos microrganismos patógenos apresentam efeito tóxico (ALMEIDA *et al.*,

2015), tendo ainda que ser estudada com aprofundamento nas questões de ingestão das mesmas pelos seres humanos, que podem afetar a saúde dos mesmos.

O efeito tóxico das nanopartículas de metais nos seres humanos se dá pela migração descontrolada dos íons de metais para a embalagem e, posteriormente, o alimento. Para garantir a saúde humana, a Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos determina limites de liberação de íons de metais na embalagem não superiores a 0,05 mg/L em água e 0,05 mg/kg nos alimentos, para que não haja um acúmulo dessas nanopartículas nas embalagens. Apesar de existir um limite e trabalhos que tratam a toxicidade dessas partículas, ainda é preciso pesquisas sobre a exposição a longo prazo das nanopartículas e possíveis doenças resultantes do seu acúmulo (KUMAR *et al.*, 2021).

### Nanopartícula de argila

Há trabalhos que testaram nanopartículas de argilas, que apresentaram, assim como as nanopartículas de metais, grande potencial antimicrobiano. Os nanocompostos a base de argila tem efeito protetor sobre o composto bioativo evitando sua perda por volatilização ou degradação e preservando a atividade antimicrobiana dos filmes, além de serem resistentes a altas temperaturas e também a ambientes ácidos. Alguns trabalhos enfatizam as vantagens do uso de misturas sinérgicas de compostos bioativos (CHEIKH; MAJDOUB; DARDER, 2022)

Chenwei *et al.* (2018) incorporaram polifenóis de chá a filmes de nanocompostos de álcool polivinílico e nanopartículas de argila e testaram sua ação *in vitro*. Os nanocompostos testados apresentaram propriedade antimicrobiana contra *E. coli* e *S. aureus*. Foram utilizadas concentrações de 0%, 0.5%, 1%, 2%, 3% e 4% sendo que, quanto maior a concentração de polifenóis, maior a capacidade antimicrobiana contra os organismos citados.

### Combinação de nanopartículas de argila com reforço de quitosana e óleos essenciais

Alguns compostos como quitosana e óleos essenciais podem ser aliados na aplicação em nanopartículas, pois aumentam o potencial antimicrobiano que as mesmas já possuem. A quitosana possui grande potencial. Estudos indicam que a superfície bacteriana carregada negativamente se liga a grupos  $\text{NH}_3^+$  carregados positivamente, causando uma mudança na permeabilidade e o vazamento de solutos para fora das

células. Além disso, a quitosana se liga ao DNA bacteriano impedindo a síntese de DNA/RNA, causando, assim, a morte celular (OLADZADABBASABADI *et al.*, 2022).

Como a quitosana, os óleos essenciais também apresentam vantagens na sua incorporação aos nanocompostos como atividade antioxidante e antimicrobiana, devido à sua estrutura química predominantemente lipofílica, auxiliando na redução da permeabilidade ao vapor de água, além do melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e ópticas de filmes comestíveis. A interação entre o composto ativo e o ambiente do alimento embalado funciona para reduzir, retardar ou inibir a oxidação e o crescimento de microrganismos patogênicos e deteriorantes (JACKSON-DAVIS *et al.*, 2023).

Souza (2018) desenvolveu uma embalagem ativa à base de quitosana incorporada a filmes adicionados de diferentes extratos de óleos essenciais de alecrim e de gengibre e nano reforçado com montmorilonite (argila extraída de rochas vulcânicas, utilizada como bio-nanocompósito). Ao testar as embalagens em carne de frango crua, foi possível notar atividade antimicrobiana e antioxidante. No entanto, o uso dos óleos essenciais citados deixou os filmes de quitosana mais frágeis e mais permeáveis. O estudo demonstrou, no entanto, que isso pode ser parcialmente resolvido com a adição da montmorilonite, que deixou os filmes mais resistentes. Tal adição, entretanto, aumentou a permeabilidade de vapor de água, diminuindo a capacidade antioxidante.

Bourakadi *et al.* (2019) utilizaram em seu estudo *in vitro* a tiabendazólio-montmorilonite (Mt) incorporada na matriz de quitosana/álcool polivinílico (CS/PVA) produzindo bio-nanocompósitos pelo método *casting*. Estes nanocompósitos apresentaram atividade antibacteriana contra três microrganismos testados, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa* e *S. aureus*, sendo avaliados pela zona de inibição dos filmes, que foram cortados e colocados em placas inoculando os microrganismos citados e incubados por um período de 24h. Após a incubação, foi possível observar que os filmes reforçados com nanoargila tiabendazólio-montmorilonita apresentaram boa atividade antimicrobiana comparado ao filme que tinha apenas quitosana/álcool polivinílico. A atividade antimicrobiana pode ser devido a incorporação de tiabendazólio-montmorilonita ou ao aumento da área específica das camadas de nanoargila de montmorilonita que podem absorver as bactérias da solução e imobilizá-los em sua superfície, que aprimoram as atividades antimicrobianas de nanocompostos. A utilização de nanopartículas de argilas, em especial a montmorilonite (MMT) tem potencial efeito antimicrobiano, além de ter baixo custo, processamento simples, maior disponibilidade no mercado, e melhoria das propriedades dos materiais

(MIRZADEH; KOKABI, 2007).

Oliveira (2022) testou *in vitro* diferentes óleos essenciais (orégano e manjeriço) em partículas de nanoargilas em embalagens à base de poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato). A adição de óleo essencial de orégano obteve redução satisfatória na contagem bacteriana de *E. coli*. A combinação haloisita e óleo essencial de orégano obteve a mesma atividade, porém, com ainda mais eficiência. No entanto, a mistura mais eficiente obteve-se a partir desses dois elementos a uma medida de óleo essencial de orégano passando por um processo de ultrassom seguido de aplicação de vácuo.

As combinações de nanopartículas com agentes antimicrobianos naturais resultam em uma maior atividade antimicrobiana, devido às interações sinérgicas, e contribuem para melhorar as propriedades físico-mecânicas dos filmes (Krepker *et al.*, 2017), trazendo como vantagem as misturas serem aprisionadas em argilas, permitindo a redução da quantidade de agentes bioativos no polímero obtendo efeito antimicrobiano e também uma atividade prolongada (CHEIKH; MAJDOUB; DARDER, 2022).

### Nanoemulsão de óleos essencial

Krepker *et al.* (2017), em um estudo *in vitro* com nanocompostos poliméricos combinados com óleos essenciais, mistura de carvacrol e timol, demonstraram que os nanocompostos causaram um crescimento menor de *E. coli*.

Lorevice (2019) produziu nanoemulsões de óleos essenciais de alecrim e alho e aplicou-os a filmes de pectina. Ambos os óleos apresentaram atividade antimicrobiana para *E. coli*, *S. Typhimurium*, *S. aureus* e *Enterococcus faecalis*. O óleo essencial de alecrim também apresentou atividade antioxidante.

Raeisi *et al.* (2021) avaliaram o efeito antibacteriano de nanofibras de proteína isoladas de soja/gelatina incorporadas com óleos essenciais de *Zataria multiflora* e *Cinnamom zeylanicum* contra *E. coli*, *S. typhimurium*, *L. monocytogenes*, *B. cereus* e *S. aureus in vitro*. O método utilizado para avaliação foi difusão de disco, difusão em poço de ágar e método de microdiluição, com a proteína de soja (SPI)/gelatina eletrofiada embebida em óleos essenciais de *Zataria multiflora* e *Cinnamom zeylanicum*. Nas análises pelos métodos de difusão em disco e poço de ágar os resultados mostraram que a zona de inibição da atividade microbiana foi maior em *Zataria multiflora*, sendo confirmado pelo método da microdiluição. No contexto geral, o filme de nanofibra incorporado com os óleos essenciais reduziram 63% a 100% da contagem microbiana dependendo das

concentrações utilizadas para diferentes microrganismos, provando ser um método promissor.

## Nanofibras

Os nanocompostos de celulose, caracterizados como nanofibras, tem importante apelo quanto a sua aplicabilidade, pois é um polímero natural forte devido as suas fibras trazendo alta resistência, possui baixo custo e é amplamente disponível (PODSIADLO *et al.*, 2005) e associado a outros compostos como óleos essenciais, quitosana e aldeídos apresentam propriedades antimicrobianas.

Yu *et al.* (2017) desenvolveram em seu estudo filmes de nanocompostos comestíveis à base de biopolímeros usando nanofibras de celulose (CNFs) em diferentes concentrações, de amido de milho e de quitosana. Para avaliar a atividade da ação antimicrobiana, foi utilizado carne bovina fresca envolta com os filmes comestíveis. Foi observado que quanto maior a concentração de nanofibras de celulose nos filmes comestíveis maior a eficiência contra o crescimento de microrganismos aeróbios deteriorantes, devido a boa propriedade de barreira ao oxigênio, reduzindo a disponibilidade do mesmo para o crescimento dos microrganismos. Fonseca (2020) produziu nanofibras à base de amido de milho e batata, incorporando-as com carvacrol. Observou-se atividade antioxidante e antimicrobiana contra *L. monocytogenes*, *Salmonella Typhimurium*, *E. coli* e *S. aureus*.

## Contrapontos da aplicação da nanotecnologia em alimentos

Apesar da eficiência comprovada frente a importantes patógenos alimentares, entre as principais preocupações em relação à nanotecnologia está seu potencial efeito de toxicidade para o ser humano.

Singh (2018) destaca que essa eventual toxicidade depende de múltiplos fatores tais quais: local de contato/exposição, duração de contato e quantidade de material ingerido. Os casos nos quais efeitos nocivos foram encontrados em seres humanos são resultado de uma alta quantidade de nanocompósitos na ingestão de alimentos que possuem embalagens com aplicação de nanopartículas. Apesar do risco de exposição ser quase nulo, se faz necessária a prevenção de possíveis riscos.

São encontradas algumas fragilidades no uso da nanotecnologia em relação a sua toxicidade, como as vias de exposição, que podem ocorrer de três maneiras nos seres humanos: inalação afetando principalmente os trabalhadores em laboratórios, ingestão

do nanomaterial que também pode ser de forma indireta considerando a migração dos mesmos para as embalagens em alimentos e absorção pela pele por contato de cosméticos. Os estudos sobre migração de nanomateriais ainda são poucos, mas se faz necessário devido à preocupação com a exposição indireta com os alimentos, e por falta de materiais é difícil avaliar os riscos que podem causar para o consumidor, pois tem de haver uma cuidadosa avaliação da natureza dos nanomateriais e a aplicação dos mesmos (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Chelliah *et al.* (2021) relatam possíveis sinais de citotoxicidade em materiais que usam nanotecnologia, o que deve ser investigado com maior aprofundamento. Capelezzo *et al.* (2018) também destacam o fato de estudos sobre a nanotecnologia ainda estarem em estágios iniciais, não sendo possível ter certeza sobre seus reais impactos em organismos vivos.

Vale destacar a grande importância das boas práticas de fabricação (BPF) na indústria, que se seguidas corretamente e aliadas à ferramentas da qualidade como 5W2H, tornarão os alimentos mais seguros para consumo humano, evitando uma série de problemas como exemplo a contaminação por patógenos alimentares, e aliado com uma tecnologia inovadora que é a nanotecnologia em embalagens ativas antimicrobianas, irão reforçar a garantia da vida útil do produto, consequentemente garantindo a sua segurança.

## CONCLUSÕES

Esta revisão de literatura abordou o uso de nanocompostos com atividade antimicrobiana em embalagens de alimentos, com foco na redução e eliminação de microrganismos patogênicos transmitidos por alimentos. Os estudos revisados exploraram diversas nanotecnologias, incluindo nanopartículas de prata, zinco, argilas, celulose e óleos essenciais, visando retardar ou inibir o crescimento de microrganismos como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes* e *Salmonella entérica*, entre outros.

Os resultados demonstraram a eficácia antimicrobiana das embalagens baseadas em nanocompostos, oferecendo uma alternativa promissora às embalagens convencionais. Estas embalagens aumentam a vida útil dos alimentos, reduzem o desperdício e melhoram a segurança alimentar. No entanto, desafios como o desenvolvimento limitado no Brasil e falta de investimento no país em pesquisas, a produção em escala industrial e a resistência do consumidor foram identificados.

É enfatizada a importância de continuar os estudos na área de nanotecnologia em embalagens antimicrobianas, considerando a necessidade de avaliar os riscos de consumo e toxicidade. A implementação de boas práticas de fabricação na indústria alimentícia é destacada como fundamental para garantir a segurança do consumidor, prevenindo a contaminação desde o início do processo de produção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. C. S. *et al.* Aplicação de nanotecnologia em embalagens de alimentos. *Polímeros*, v. 25, n. spe, p. 89-97, dez. 2015.

ALMEIDA, G. W. R. DE. Desenvolvimento e caracterização de filme nanocompósito de base celulósica e sua avaliação como embalagem ativa antimicrobiana. 27 jul. 2010.

ARAÚJO, Luís Otávio de. Embalagens ativas: síntese de filmes antimicrobianos à base de Polietileno de baixa densidade e zeólita A contendo prata. 2019. Dissertação de Mestrado. Brasil.

AZIZI-LALABADI, M.; GARAVAND, F.; JAFARI, S. M. Incorporation of silver nanoparticles into active antimicrobial nanocomposites: Release behavior, analyzing techniques, applications and safety issues. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 293, p. 102440, 1 jul. 2021.

BOURAKADI, K. E. *et al.* Chitosan/polyvinyl alcohol/thiabendazolum-montmorillonite bio-nanocomposite films: Mechanical, morphological and antimicrobial properties. *Composites Part B: Engineering*, v. 172, p. 103-110, set. 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde, Manual integrado de vigilância, prevenção e controle de doenças transmitidas por alimentos. Brasília 2010, 158p. Disponível em: [http://bvsm.sau.gov.br/bvs/publicacoes/manual\\_integrado\\_prevencao\\_doencas\\_alimentos.pdf](http://bvsm.sau.gov.br/bvs/publicacoes/manual_integrado_prevencao_doencas_alimentos.pdf). Acesso em 25 de Fevereiro de 2022

BRITO, S. C. *et al.* Filmes poliméricos com nanopartículas de prata fornecem atividade antimicrobiana para embalagens alimentícias. 2019.

CAPELEZZO, A. P. *et al.* ANTIMICROBIAL BIODEGRADABLE POLYMER THROUGH ADDITIVATION WITH ZINC BASED COMPOUNDS. *Química Nova*, 2018.

CELESTINO, Vinícius Peres *et al.* Adição de agentes antimicrobianos em filmes poliméricos a base de blenda de polietileno para aplicação em embalagens flexíveis para alimentos. 2021.

CHAUDRY, Q.; CASTLE, L. Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, Amsterdam, v. 22, n. 11, p. 595-603, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2011.01.001>

CHEIKH, D.; MAJDOUB, H.; DARDER, M. An overview of clay-polymer nanocomposites containing bioactive compounds for food packaging applications. **Applied Clay Science**, v. 216, p. 106335, 1 jan. 2022.

CHELLIAH, R. et al. Development of Nanosensors Based Intelligent Packaging Systems: Food Quality and Medicine. **Nanomaterials**, v. 11, n. 6, p. 1515, jun. 2021.

CHENWEI, C. et al. Physicochemical, microstructural, antioxidant and antimicrobial properties of active packaging films based on poly(vinyl alcohol)/clay nanocomposite incorporated with tea polyphenols. **Progress in Organic Coatings**, v. 123, p. 176-184, 2018.

DE ABREU, D. A. P. *et al.* Evaluation of the Effectiveness of a Paper Containing Nanoparticles of Silver Combined with Moisture Absorbers Over Quality of Tuna Snacks. **Journal of Food Chemistry and Nanotechnology**, v. 2, n. 1, 2016

Dia Mundial da Segurança dos Alimentos 2021: PANAFTOSA impulsiona a cooperação técnica da segurança dos alimentos para países da região das Américas - OPAS/OMS | Organização Pan-Americana da Saúde. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/7-6-2021-dia-mundial-da-seguranca-dos-alimentos-2021-panaftosa-impulsa-cooperacao-tecnica>

ESMAILZADEH, H. *et al.* Effect of nanocomposite packaging containing ZnO on growth of *Bacillus subtilis* and *Enterobacter aerogenes*. **Materials Science and Engineering: C**, v. 58, p. 1058-1063, jan. 2016.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. DO C. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, v. 32, n. 7, p. 1860-1870, 2009.

FERREIRA, Thiago Péricles Martins. Desenvolvimento de filmes de PVOH/NCC revestidos com nanopartículas de prata para aplicação como embalagens flexíveis ativas. 2021.

FONSECA, Laura Martins. Produção de nanofibras de amido e carvacrol com atividades antimicrobiana e antioxidante. 2020.

HAKHEEM, M. J. *et al.* Active Packaging of Immobilized Zinc Oxide Nanoparticles Controls *Campylobacter jejuni* in Raw Chicken Meat. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 86, n. 22, p. e01195-20, 28 out. 2020.

JACKSON-DAVIS, A. *et al.* A Review of Regulatory Standards and Advances in Essential Oils as Antimicrobials in Foods. **Journal of Food Protection**, v. 86, n. 2, p. 100025, 2023.

KREPKER, M. *et al.* Active food packaging films with synergistic antimicrobial activity, **Food Control** (2017), doi: 10.1016/j.foodcont.2017.01.014

KUMAR, S. *et al.* Plant extract mediated silver nanoparticles and their applications as antimicrobials and in sustainable food packaging: A state-of-the-art review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 112, p. 651-666, jun. 2021.

LOREVICE, Marcos Vinicius. Nanoemulsões de óleos essenciais: mecanismos de estabilidade e interação com pectina em bionanocompósitos para aplicação em embalagens ativas. 2019.

MIRZADEH, Amin; KOKABI, Mehrdad. The effect of composition and draw-down ratio on morphology and oxygen permeability of polypropylene nanocomposite blown films. *European Polymer Journal*, v. 43, n. 9, p. 3757-3765, 2007.

MÜLLER, Leidiani. Tratamento com plasma frio em PELBD para desenvolvimento de filmes antibacterianos contendo nanopartículas de ZnO, amido e quitosana. 2019.

MUSTAFA, F.; ANDREESCU, S. Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications. *RSC Advances*, v. 10, n. 33, p. 19309-19336, 2020.

Nanotecnologia. Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-nanotecnologia/nota-tecnica>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NanoArgila. Disponível em: <<https://petnanoifrj.wixsite.com/petnanoifrj/nanoargila>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

O que são os polímeros? Introdução ao estudo dos polímeros. Disponível em: <<https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/o-que-sao-os-polimeros.htm>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

OLADZADABBASABADI, N. *et al.* Recent advances in extraction, modification, and application of chitosan in packaging industry. **Carbohydrate Polymers**, v. 277, p. 118876, 1 fev. 2022.

OLIVEIRA, Pâmela Rosa *et al.* Modificação de nanopartículas do grupo caulim com óleos essenciais e aplicação em embalagens ativas à base de poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato). 2022.

PADULA, M.; ITO, D. EMBALAGEM E SEGURANÇA DOS ALIMENTOS. v. 18, 2006.

PODSIADLO, P. *et al.* Molecularly Engineered Nanocomposites: Layer-by-Layer Assembly of Cellulose Nanocrystals. *Biomacromolecules*, v. 6, n. 6, p. 2914-2918, 1 nov. 2005.

PICHLER, J. *et al.* Evaluating levels of knowledge on food safety among food handlers from restaurants and various catering businesses in Vienna, Austria 2011/2012. **Food Control**, v. 35, n. 1, p. 33-40, 1 jan. 2014.

PRIMOŽIČ, M.; KNEZ, Ž.; LEITGEB, M. (Bio)Nanotechnology in Food Science—Food Packaging. *Nanomaterials*, v. 11, n. 2, p. 292, 22 jan. 2021.

RAEISI, M. *et al.* Physicochemical and antibacterial effect of Soy Protein Isolate/Gelatin electrospun nanofibres incorporated with *Zataria multiflora* and *Cinnamomum zeylanicum* essential oils. *Journal of Food Measurement and Characterization*, v. 15, n. 2, p. 1116-1126, abr. 2021.

RUMAYOR, V. G.; IGLESIAS, E. G.; GALÁN, O. R.; CABEZAS, L. G. Aplicaciones de biosensores en la industria agroalimentaria. Madrid: Elecé Industria Gráfica, 2005. 113p

SHAO, J. *et al.* Enhancing microbial management and shelf life of shrimp *Penaeus vannamei* by using nanoparticles of metallic oxides as an alternate active packaging tool to synthetic chemicals. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 28, p. 100652, jun. 2021.

SINGH, P. Nanotechnology in food preservation. *FOOD SCIENCE RESEARCH JOURNAL*, v. 9, p. 441-447, 15 out. 2018.

SOUZA, Victor Gomes Lauriano de. Desenvolvimento de bio-nanocompósitos de qui-tosano/montmorilonite incorporados com extratos naturais como embalagens ativas para alimentos. 2018.

YU, Z. *et al.* Effect and mechanism of cellulose nanofibrils on the active functions of biopolymer-based nanocomposite films. *Food Research International*, v. 99, p. 166-172, set. 2017.

ZHANG, W. *et al.* High performance biopolymeric packaging films containing zinc oxide nanoparticles for fresh food preservation: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 230, p. 123188, 1 mar. 2023.

ZHOU, S. *et al.* Development of sodium chloin food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 363, p. 1-24, 2011.