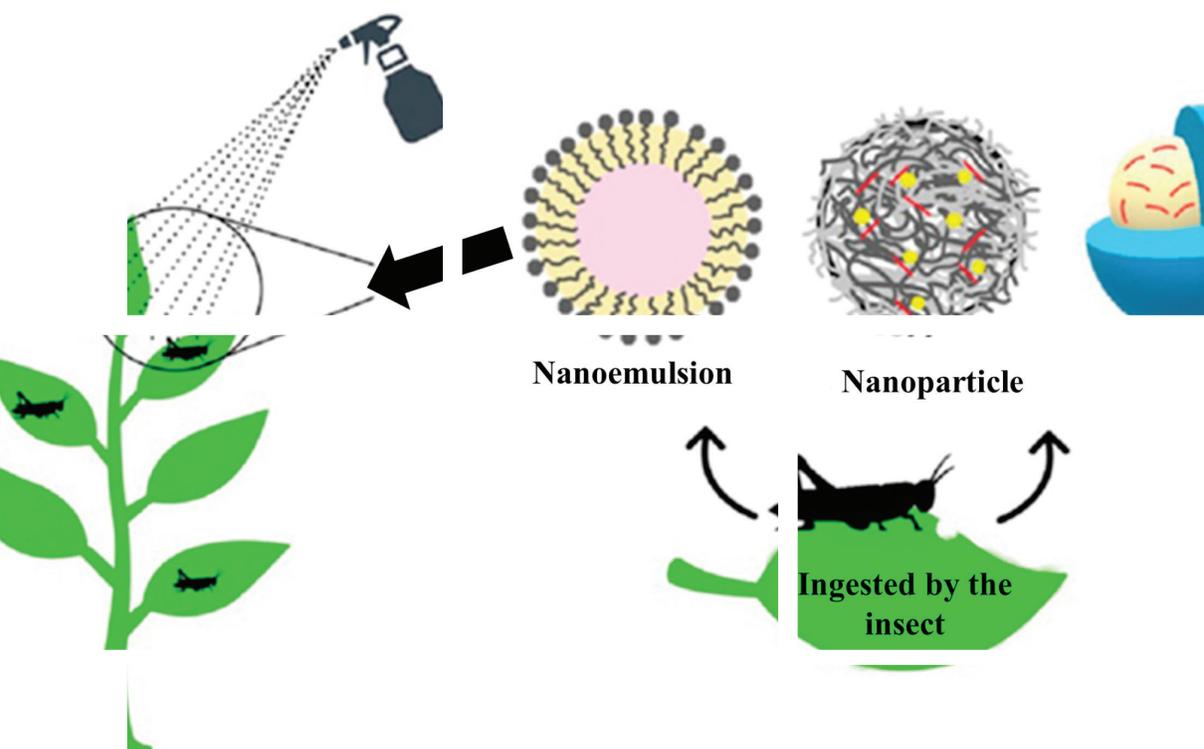


# Técnicas nanotecnológicas para a agricultura e pecuária – um enfoque em controle de pragas e doenças, nutrição e saúde animal





**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Gado de Corte  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

## **DOCUMENTOS 273**

# Técnicas nanotecnológicas para a agricultura e pecuária – um enfoque em controle de pragas e doenças, nutrição e saúde animal

*Marlene de Barros Coelho*

**Embrapa Gado de Corte**  
Campo Grande, MS  
2020

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Gado de Corte**  
Av. Rádio Maia, 830, Zona Rural, Campo Grande, MS,  
79106-550, Campo Grande, MS  
Fone: (67) 3368 2000  
Fax: (67) 3368 2150  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações  
da Embrapa Gado de Corte

Presidente  
*Gilberto Romeiro de Oliveira Menezes*

Secretário-Executivo  
*Rodrigo Carvalho Alva*

Membros  
*Alexandre Romeiro de Araújo, Andréa Alves do Egito, Liana Jank, Lucimara Chiari, Marcelo Castro Pereira, Mariane de Mendonça Vilela, Rodney de Arruda Mauro, Wilson Werner Koller*

Supervisão editorial  
*Rodrigo Carvalho Alva*

Revisão de texto  
*Rodrigo Carvalho Alva*

Tratamento das ilustrações  
*Rodrigo Carvalho Alva*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica  
*Rodrigo Carvalho Alva*

Foto da capa

**1ª edição**  
Publicação digitalizada (2020)

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Gado de Corte

---

Coelho, Marlene de Barros.

Técnicas nanotecnológicas para a agricultura e pecuária : um enfoque em controle de pragas e doenças, nutrição e saúde animal / Marlene de Barros Coelho. - Campo Grande, MS : Embrapa Gado de Corte, 2020.

PDF (50 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Gado de Corte, ISSN 1983-974X ; 273).

1. Agronegócio. 2. Biotecnologia. 3. Microscopia eletrônica. 4. Nanotecnologia. 5. Produção agrícola. 6. Tecnologia. I. Título. II. Série.

## Autores

### **Marlene de Barros Coelho**

Engenheira Metalurgista, doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas, pesquisadora da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS



## Sumário

Resumo .....	7
Abstract .....	9
Introdução.....	10
Os materiais nanométricos são especiais .....	15
Tipos de nanomateriais .....	26
Nanomateriais orgânicos.....	27
Nanomateriais combinados orgânicos / inorgânicos (híbridos).....	28
Nanomateriais inorgânicos.....	29
Aplicação de nanomateriais na produção agropecuária .....	29
Considerações sobre segurança dos produtos nanotecnológicos .....	39
Conclusão e perspectivas futuras .....	41
Referências .....	43



## Resumo

A nanotecnologia com seus nanomateriais e nanoestruturas representam uma alternativa promissora de desenvolvimento científico, onde novos produtos podem oferecer uma variedade muito grande de benefícios para a sociedade. Nesta ciência do “invisível”, saindo da macroescala para a nanoescala, descrever e controlar um comportamento *sui generis* como é o comportamento de diversas estruturas nanométricas é a força motriz para entender a melhor forma de usá-las em nanotecnologias para o agronegócio. Na nanoescala os materiais tendem a apresentar propriedades muito especiais ao interagir com uma fonte de luz e, como possuem alta relação superfície/volume, a reatividade química é muito elevada e o ponto de fusão é bem mais baixo, por exemplo. Com base nessas propriedades especiais, é que a última década testemunhou o desenvolvimento de uma variedade de tipos de nanoformulações para as mais diversas aplicações na agricultura e indústria de alimentos. Já foi publicado um número considerável de revisões, que fornecem conhecimento sobre os desenvolvimentos mais recentes na pesquisa em nanopesticidas. Mais de 3000 pedidos de patentes foram apresentados na última década apenas para nanopesticidas, com destaque para as formulações à base de polímeros, metal-óxido metálico e nanoemulsões. A eficácia das nanoformulações é embasada pelos inúmeros resultados de pesquisa ao redor do mundo, que mostram valores de desempenho superiores quando comparadas com formulações comerciais, como o aumento na solubilidade de ingredientes ativos fracamente solúveis, a liberação lenta ou direcionada de outros ingredientes ativos e a proteção contra degradação prematura no ambiente. E a eficácia superior deve resultar em menores encargos ambientais, mesmo que ainda não haja consenso entre os resultados promissores neste campo emergente e os cientistas das áreas ambientais. O impacto positivo das nanoformulações na proteção de culturas deve melhorar a produção agrícola como um todo. Esta publicação reúne uma abordagem geral sobre a razão pela qual os nanomateriais possuem um potencial tão importante para uso na agropecuária, como no controle de pragas e doenças, desde colocações sobre as propriedades mais relevantes associadas à escala nanométrica, até alguns exemplos de aplicação.

**Palavras-chave:** Nanopesticida, agroquímicos nanoencapsulados, nanominerais, nanoformulações



## Abstract

*Nanotechnology with its nanomaterials and nanostructures represents a promising alternative for scientific development, where new products can offer a very wide variety of benefits to society. In this science of the “invisible”, moving from the macroscale to the nanoscale, the description and control of sui generis behavior as the behavior of several nanometric structures are the driving force to understand the best way to use them in nanotechnologies for agribusiness. At the nanoscale, materials have very special properties when interacting with a source of light and, as they have a high surface/volume ratio, the chemical reactivity is very high and the melting point is much lower, for example. Based on these special properties, the past decade has witnessed the development of a variety of types of nanoformulations for the most diverse applications in agriculture and the food industry. A considerable number of reviews has already been published, providing insight into the latest developments in nanopesticide research. More than 3000 patent applications have been filed in the last decade for nanopesticides alone, with emphasis on formulations based on polymers, metal-metal oxide and nanoemulsions. The effectiveness of nanoformulations is based on the numerous research results around the world, which show superior performance values when compared to commercial formulations, such as the increase in solubility of poorly soluble active ingredients, the slow or targeted release of active ingredients and the protection against premature degradation in the environment. And superior effectiveness should result in lower environmental burdens, even though there is still no consensus between the promising results in this emerging field and scientists in the environmental fields. The positive impact of nanoformulations on crop protection should improve agricultural production as a whole. This publication brings together a general approach on why nanomaterials have such an important potential for use in agriculture, as in the control of pests and diseases, from placements on the most relevant properties associated with the nanometer scale, to some application examples.*

**Keywords:** *Nanopesticide, nanoencapsulated agrochemicals, nanominerals, nanoformulations.*

## Introdução

As tentativas de aumentar a produção de alimentos, levando em consideração o crescimento populacional, a disponibilidade limitada de recursos terrestres e hídricos, as mudanças climáticas, alta incidência de doenças e pragas e bioacumulação de agroquímicos, estão entre os grandes desafios globais. Para superar as duras ameaças à maior produção de alimentos, foram desenvolvidas diferentes inovações tecnológicas, como variedades de alto rendimento, fertilizantes, pesticidas sintéticos, sementes híbridas e culturas transgênicas que contribuíram para melhorar a sustentabilidade agrícola global. Infelizmente, a extrema dependência dessas inovações contribuiu para muitos efeitos negativos. Desequilíbrio de micronutrientes, poluição de nitratos e eutrofização são as sérias consequências de fertilizantes aplicados excessivamente ou indevidamente. Da mesma forma, o uso intenso de pesticidas representa o maior risco para organismos não alvo, incluindo seres humanos, microrganismos e insetos benéficos, aves, minhocas e formas de vida aquática. Além disso, a bioampliação, o desenvolvimento da resistência a pesticidas e o ressurgimento de populações de pragas são os sérios problemas associados ao uso de pesticidas. A sensibilidade de culturas de alto rendimento a doenças, insetos e fatores abióticos intensificou o uso de fertilizantes e pesticidas. As culturas geneticamente modificadas são uma das maiores tentativas de minimizar tratamentos químicos, porém, infelizmente, as pragas também podem desenvolver resistência às estas culturas, pois já desenvolveram resistência a muitos pesticidas (Pandey et al., 2018). O relatório de Tabashnik e colaboradores (2013) demonstra como a evolução da resistência em pragas pode, por exemplo, reduzir a efetividade de proteínas inseticidas de *Bacillus thuringiensis* (Bt) produzidas por culturas transgênicas. Os autores apuraram que, embora a maioria das populações de pragas ainda permanecesse suscetível até 2013, a eficácia reduzida das culturas Bt, causada pela resistência desenvolvida em campo, foi relatada para algumas populações de 5 das 13 principais populações de pragas examinadas, em comparação com populações resistentes de apenas uma espécie em 2005. Além disso, novos genes podem desencadear riscos de transferência horizontal do material genético introduzido com consequências ecológicas e econômicas mais graves e duradouras (Burmeister, 2015). E, à exceção das novas linhagens de plantas, cada uma das inovações na agricultura moderna

citadas acima depende totalmente dos recursos energéticos, especialmente do petróleo. E, neste caso também, as previsões são preocupantes. Prevê-se que a produção global de petróleo chegue ao máximo, na melhor das hipóteses, até 2040 e caia posteriormente, um fenômeno conhecido como pico de petróleo (Tsoskounoglou et al., 2008).

Colocando em números a dimensão dos desafios a serem vencidos, estima-se que, em 2050, a população mundial esperada será maior do que 9 bilhões, o que implica aumentos significativos na produção de várias commodities importantes,. Prevê-se que a produção global de alimentos deverá aumentar cerca de 70%, uma estimativa conservadora frente a desafios como o do aquecimento global (Friedrich, 2015). A produção anual de cereais, por exemplo, teria que aumentar para quase um bilhão de toneladas, a produção de carne em mais de 200 milhões de toneladas até um total de 470 milhões de toneladas em 2050, 72% destas nos países em desenvolvimento, acima dos 58% de hoje. Alimentar a população mundial adequadamente também significará produzir os tipos de alimentos que faltam para garantir a segurança nutricional. E é natural concluir que, a crescente demanda por carne sobrecarregará as terras agrícolas e será necessário produzir mais alimentos para os animais.

Contudo, a produtividade das culturas agrícolas para consumo humano está em risco devido à incidência de pragas, especialmente ervas daninhas, microrganismos patogênicos e insetos que prejudicam a produção animal. As perdas de culturas devido a esses organismos prejudiciais podem ser substanciais e podem ser evitadas ou reduzidas por medidas de proteção de culturas. Savary e colaboradores (2019) realizaram um levantamento com estimativas numéricas para as perdas de rendimento causadas por 137 pragas e patógenos em 5 principais culturas do mundo (trigo, arroz, milho, batata e soja). As perdas globais de colheitas causadas por pragas e patógenos, segundo os autores, variam entre 17 e 23% para todas as cinco culturas, exceto arroz, para o qual a estimativa é de 30%. Comparando este estudo com outra pesquisa global (Oerke, 2006), também sobre perdas de produção, eles observaram que nenhuma mudança importante no aspecto de fitossanidade ocorreu entre 2001-2003 e 2017. Outra conclusão importante do estudo é que as maiores perdas estão associadas com regiões de déficit alimentar com populações de rápido crescimento e, frequentemente, com pragas e doenças emergentes ou reemergentes.

Lidar com pequenas perdas de safra pode ser economicamente aceitável. No entanto, um aumento na produtividade das culturas sem a proteção adequada é um risco porque um planejamento com expectativa de resultados de produção maiores está associado a uma maior vulnerabilidade a danos causados por pragas. A utilização de agrotóxicos deveria ser considerada apenas quando a população dos organismos que causam problemas nas plantações atingisse um nível de dano econômico (em que as perdas de produção gerem prejuízos econômicos significativos). Então, o desafio está na busca pelo equilíbrio entre produtividade e manejo de pragas. E uma das saídas é manejo ou o controle integrado de pragas e doenças. A situação mais próxima da ideal seria o monitoramento das pragas evitando, ao máximo, o uso de defensivos químicos no sistema. O manejo ou o controle integrado de pragas (MIP) é resultado da tomada de consciência de que não se pode, ou não se deve, continuar na dependência exclusiva de inseticidas que, em várias ocasiões, têm sido utilizados, preventivamente, no controle de pragas (Valério e Koller, 1992). Inúmeros exemplos ilustram uma dependência cada vez maior pelos produtos químicos, seja por resistência aos inseticidas, reinfestação da praga, ou mesmo pela ocorrência de pragas até então tidas como secundárias, ocasionando, além do custo elevado no controle, problemas de ordens ambiental e social.

Após anos de pesquisa e observações, a Embrapa possui documentos orientadores à disposição da sociedade brasileira sobre o manejo integrado de pragas, que, conceitualmente, visam a redução na quantidade/frequência de pesticidas aplicados a um nível aceitável econômica e ecologicamente. Os conhecimentos sobre taxonomia, biologia e ecologia são a base do MIP e vão subsidiar a identificação das pragas-chaves e dos inimigos naturais, o seu monitoramento e o manejo do agroecossistema, priorizando condições para o equilíbrio das plantas e o combate natural das pragas. No caso do controle químico, devem ser utilizados produtos seletivos em favor dos inimigos naturais e polinizadores, além da rotação de produtos por modos de ação e grupo químico, a fim de evitar a resistência.

Além disso, a exposição aos agrotóxicos e os impactos que estes podem causar tornaram-se, também, uma questão relevante de saúde pública. Um relatório divulgado no ano de 2018, por especialistas das Nações Unidas (ONU) estimou que cerca de 200.000 pessoas em todo o mundo morrem a

cada ano por intoxicação aguda por pesticidas - principalmente trabalhadores rurais e comunidades próximas. No Brasil, 84.200 pessoas foram envenenadas pela exposição a pesticidas entre 2007 e 2015, ou uma média de 25 pessoas por dia, de acordo com dados do Relatório Nacional de Vigilância Sanitária em 2018 do Ministério da Saúde sobre populações expostas a pesticidas (Brasil, 2018). Pesquisas sugerem que a exposição dos trabalhadores rurais a pesticidas agrícolas aumenta o risco de várias formas de câncer, além de distúrbios hormonais e defeitos congênitos. Estudos que ligam alimentos que contêm resíduos de pesticidas a um risco aumentado de câncer e outras doenças têm sido menos conclusivos.

Há ainda o efeito deletério sobre microrganismos benéficos não visados, um risco para outras formas de vida, contaminação das águas subterrâneas e superficiais e desenvolvimento de resistência a pesticidas são alguns dos principais riscos associados ao uso massivo de pesticidas.

Outro ponto importante em relação à agropecuária, são as mudanças climáticas que afetarão a ocorrência e distribuição de pragas e doenças que podem causar impactos negativos imprevisíveis na produção agrícola em todo o mundo (FAO, 2016). Esse risco inevitável para a segurança alimentar e a agricultura, atrairá mais problemas aos países em desenvolvimento.

Todas estas colocações geram incertezas, mas também oportunidades de inovação. Diferente do modelo básico de agricultura no Brasil, em que não havia a pressão por aumento de produtividade, nos dias atuais há que se considerar ainda a sustentabilidade do sistema produtivo. Hoje, acredita-se que ganhos de produtividade com sustentabilidade só são conseguidos pela adoção de tecnologias resultantes dos esforços da pesquisa. E, se os índices de produtividade aumentam, passa-se a exigir maior refinamento das soluções tecnológicas para aperfeiçoá-los ainda mais. Com isso, as diversas discussões, estudos, artigos sobre sistemas de inovação na área de ciências agrárias demonstram a necessidade de se atingir um novo patamar de mudanças na agropecuária visando o aumento da produção e da produtividade. E a evolução deste setor passa, necessariamente, pela automação com maquinário moderno; o uso mais inteligente de insumos e a aplicação de técnicas e estudos genéticos mais avançados na produção de plantas e animais.

Por outro lado, os esforços de pesquisa devem ser combinados com o setor produtivo, que exerce o papel de assimilação da tecnologia desenvolvida. Havendo esse “casamento”, a inovação de fato acontece e a produção agropecuária avança em ganhos de produtividade. Exemplo disso é a transformação do Cerrado em área produtiva mesmo com todos os desafios observados neste bioma. A Embrapa se esforça continuamente para manter-se na fronteira tecnológica internacional da agricultura e, por isso, desenvolve pesquisas em nanobiotecnologia aplicada ao agronegócio, além da genômica avançada para o melhoramento genético de plantas e animais.

Neste cenário, a nanotecnologia com seus nanomateriais, nanofilmes, nanoestruturas e nanoemulsões representam uma alternativa promissora de desenvolvimento científico onde novos produtos podem oferecer uma variedade de benefícios, incluindo maior eficácia, durabilidade e redução das quantidades de ingredientes ativos (IAs) que estão sendo usados na proteção de culturas contra doenças e pragas. A última década testemunhou o desenvolvimento de uma variedade de tipos de nanoformulações, incluindo nanoemulsões, microemulsão, nanocápsulas, nanoesferas, nanopartículas lipídicas sólidas, produtos contendo nanopartículas de metais e óxidos metálicos, nanopartículas de sílica oca porosa e nanoargilas para as mais diversas aplicações na agricultura e indústria de alimentos. Já foi publicado um número considerável de revisões que fornecem conhecimento sobre os desenvolvimentos mais recentes na pesquisa em nanopesticidas (Gogos et al., 2012; Fernandes et al., 2014; Kitherian, 2016; Lade et al., 2019; Vurro et al., 2019). Mais de 3000 pedidos de patentes foram apresentados na última década apenas para nanopesticidas. Formulações à base de polímeros, metal / óxido metálico e nanoemulsões são os materiais/estruturas que aparecem com maior frequência (APVMA, 2015).

Mesmo que o aumento da eficácia das nanoformulações ainda não tenha sido totalmente elucidado, são os valores de determinadas características mais ressaltados nos resultados de pesquisa que embasam a conclusão de que estes novos produtos tornam as nanoformulações superiores em comparação com formulações comerciais. Características de desempenho como o aumento na solubilidade aparente de ingredientes ativos fracamente solúveis, a liberação lenta ou direcionada de outros ingredientes ativos e a proteção contra degradação prematura no ambiente (Kitherian, 2016; Pavoni et

al., 2019). Além disso, nos experimentos, em geral as nanoformulações são necessárias em doses mais baixas do que as formulações convencionais com eficácia superior em muitos casos, o que resulta em menores encargos ambientais. O impacto positivo das nanoformulações na proteção de culturas é, portanto, enorme para melhorar a produção agrícola. Porém, ainda não há consenso entre todas as pesquisas em relação aos diversos resultados promissores neste campo emergente e os cientistas das áreas ambientais. Todos têm, então, o grande desafio de elucidar todos os possíveis perigos (APVMA, 2015; Mishra et al., 2017; Röder et al., 2019). Contudo, quanto mais estas questões forem debatidas e apresentadas as diferentes visões, melhores serão as contribuições nanotecnológicas para a proteção de culturas, com maior qualidade, segurança para as pessoas, animais e meio ambiente.

As informações reunidas nesta publicação têm o objetivo de apresentar ao público em geral os materiais que em escala nanométrica podem contribuir de forma relevante para o controle de pragas e doenças, reduzindo, principalmente, as quantidades utilizadas de defensivos pelo aumento da eficácia. Será abordada uma visão geral das oportunidades, ainda incipientes em muitos casos, mas com grande expectativa de que contribuirão significativamente para as inovações esperadas para o agronegócio, que estão sendo abrangidas pela nanotecnologia aplicada aos vários métodos de controle de pragas desenvolvidos no passado.

## Os materiais nanométricos são especiais

Desde o tempo em que se utilizava a madeira das árvores e outras fibras vegetais, a pedra lascada, pele dos animais ou mesmo os seus tendões, quando os primeiros seres humanos confeccionavam armas de caça, abrigos, roupas, calçados, as necessidades humanas e os materiais sintéticos evoluíram consideravelmente. Hoje, existe no mundo uma infinidade de produtos (ferramentas, utensílios, dispositivos eletrônicos, objetos) para atender as necessidades humanas individuais, das indústrias, da produção de alimentos, de informação, etc. E, a cada dia, novos produtos são disponibilizados e comercializados para todos os tipos de setores da economia de um país. Da mesma forma, surgem a cada dia necessidades não atendidas ou que precisam de desempenho melhorado. Para isso, é imprescindível uma

constante evolução em nossa capacidade de projetar, sintetizar e processar novos materiais ou estruturas. O uso destes novos materiais nos computadores, dispositivos eletrônicos, máquinas, medicamentos, itens esportivos e outros os tornam mais eficientes em suas aplicações. A partir disso, novas necessidades surgem e esta evolução continua.

O grafeno é um exemplo bem típico de como evoluem os materiais. É uma estrutura a base de carbono descrita como mais resistente que o aço e a mais leve e mais fina que se tem conhecimento (é um milhão de vezes mais fino que um fio de cabelo humano) e, por isso, diversos outros produtos foram projetados e colocados à disposição das pessoas a partir do grafeno. Produzido pela primeira vez em um laboratório em 2003, grafeno é o nome dado a uma substância composta por uma única camada de átomos de carbono, extraída do grafite, com propriedades surpreendentes. Possui, em peso, resistência mecânica cerca de 100 vezes maior do que o aço; conduz eletricidade e calor de forma muito eficiente; é mais flexível que a borracha; e é quase transparente. Andre Geim e Konstantin Novoselov, da Universidade de Manchester, ganharam, em 2010, o Prêmio Nobel de Física com este trabalho na categoria “experiências inovadoras relativas ao material grafeno bidimensional” (Novoselov et al., 2004).

Um dos exemplos de aplicação é o seu uso em tratamento de água por ser uma estrutura porosa. Com seus poros do tamanho de nanômetros, o grafeno pode atuar como um filtro de água extremamente preciso com um fluxo de água rápido. É capaz de interagir físico-quimicamente com diversas moléculas com um alto grau de precisão, retendo em seus poros algumas moléculas enquanto deixa outras passarem livremente. Fazendo uma comparação, as membranas usadas na osmose reversa para filtrar o sal da água salgada são mil vezes mais espessas que o grafeno, exigindo assim uma pressão extremamente alta e muita energia para forçar a água através delas. Assim, um sistema com grafeno pode operar com requisitos de pressão e energia muito mais baixos e, portanto, purificar a água a um custo menor. Materiais como grafeno, por serem materiais tenazes, podem revolucionar completamente o desenho industrial de diversos produtos, gerando inovação sempre.

Analisando os diversos produtos industrializados já citados anteriormente (dispositivos eletrônicos, drones, utensílios diversos, artigos esportivos, etc.) podemos dizer que todos eles contemplam algum dos seguintes materiais

em sua fabricação: ligas ferrosas, ouro, prata, zinco, alumínio e outros tantos metais e suas ligas, plásticos variados (biodegradáveis ou não), cerâmicas, vidros, borracha e madeira. São inúmeros os materiais diferentes que nos rodeiam. Observamos à nossa volta e vemos os exemplos do universo de objetos, de utilidades variadas, no mundo visível, ou seja, no qual podemos enxergar a olho nu.

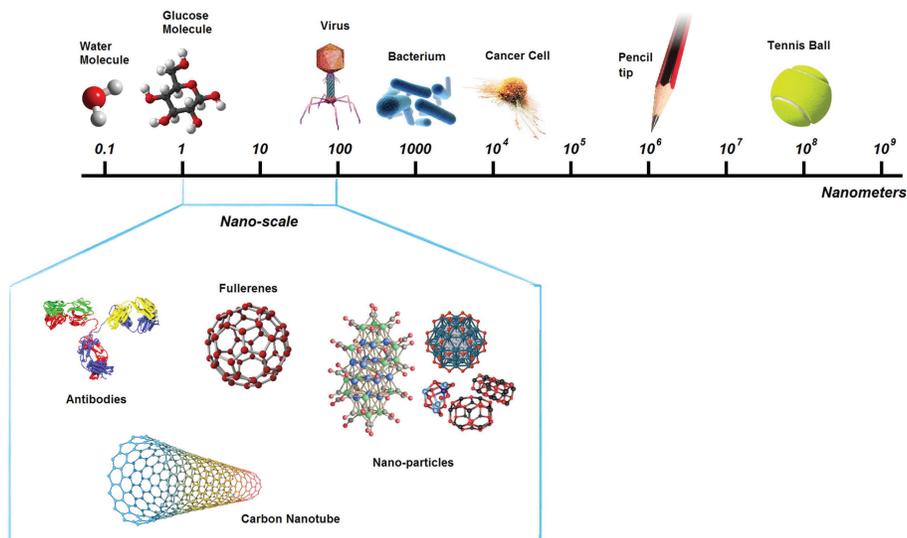
Porém há um universo de estruturas, microrganismos e materiais invisíveis aos nossos olhos, mas bem visíveis usando equipamentos especiais, lupas ou microscópios. Com o auxílio destes equipamentos vemos a forma intrigante das partículas minúsculas de poeira, e dos poros de uma folha; a superfície de um grão de pólen; a estrutura de uma teia de aranha; gotículas de um espirro às vezes cheias de vírus; a estrutura da asa de um inseto, etc. Olhando para as nossas mãos, sabemos que há milhares de bactérias presentes ali. Entretanto, não tem como enxergar organismos tão pequenos sem um microscópio ótico, que é o equipamento mais simples e barato que muitos pesquisadores utilizam para o estudo e observação do mundo microscópico.

Reduzindo ainda mais a escala de observação, contamos com o auxílio de microscópios ainda mais sofisticados, chamados microscópios eletrônicos, que também estão presentes em laboratórios avançados de pesquisa em materiais e biologia. Com o desenvolvimento dos microscópios eletrônicos, que utilizam métodos exclusivos para resolver as características da superfície dos materiais até a escala atômica, é possível “enxergar” um universo de partículas mil vezes menores do que a espessura de um fio de cabelo, que é de aproximadamente 70  $\mu\text{m}$  (setenta micrômetros; um micrômetro é igual a  $10^{-6}$  m). As dimensões mil vezes menores que as micrométricas são o que definem a escala nanométrica. O prefixo *nano* vem do grego e significa anão, onde um nanômetro é o mesmo que  $10^{-9}$  m. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de objetos de diferentes tamanhos desde a escala macrométrica, passando pela micrométrica até a escala nanométrica. A disponibilização de diversos equipamentos especializados -como os microscópios eletrônicos capazes de manipular a matéria nesta escala extremamente pequena- abriu efetivamente as portas para novas tecnologias.

Compondo o prefixo nano e tecnologias associadas a esta escala, tem-se o termo “Nanotecnologia”. Nanotecnologia é a manipulação, controle e integração de átomos e moléculas para formar materiais, estruturas, componentes,

dispositivos e sistemas em escala nanométrica (Hornyak et al., 2009), conceitualmente, menor do que 100 nm. A nanotecnologia é uma ciência de ponta que oferece oportunidades para desenvolver produtos e aplicações inovadoras para inúmeros setores industriais e consumidores finais. Esta ciência deriva de uma ampla gama de campos, incluindo física, ciência dos materiais, química supramolecular e polímeros, interface e ciência coloidal, biologia e também, das engenharias: de materiais, química, mecânica e elétrica. Todo o desenvolvimento de produtos nanotecnológicos necessita de esforço interdisciplinar para superar os principais problemas técnicos enfrentados pelos pesquisadores, para que possam realizar os avanços de mudança de paradigma que procuram. Pois, mais do que operar instrumentos sofisticados de síntese e análise de materiais, é entender o que é observado com eles. Isto exige familiaridade com química, ciência de superfície e até estrutura eletrônica (Bunk, 2001). A busca por metodologias de síntese otimizadas, caracterizações de materiais mais corretas, reprodutibilidade, custo mais baixo, controle de toxicidade e escalabilidade estão entre os maiores desafios da nanotecnologia.

Desde a década de 1930, os cientistas podem ver partículas e suas estruturas em escala nanométrica usando instrumentos como o microscópio eletrônico de varredura, o microscópio eletrônico de transmissão e o microscópio de íons de campo. O microscópio eletrônico de varredura (MEV), por exemplo, usa um feixe de elétrons primários de alta energia que interage com amostras, biológicas ou não, e elétrons secundários são emitidos da superfície destas amostras, estes elétrons secundários são coletados por detectores no equipamento e são usados para criar uma imagem altamente ampliada. Microscópios eletrônicos produzem uma resolução muito maior do que os microscópios óticos; com eles se obtém ampliações de até 1 milhão de vezes (resolução teórica de 3nm), enquanto os melhores microscópios óticos podem ampliar uma imagem apenas cerca de 1.500 vezes. Devido à sua alta resolução, estes equipamentos fornecem imagens detalhadas das superfícies de ligas metálicas, cerâmicas, alguns polímeros ou mesmo de células, tecidos e organismos inteiros. Também, podem ser usados para estudar a distribuição superficial de imunomarcadores, para a contagem de partículas e determinação de tamanho, estudar a topografia de estruturas e a composição atômica das amostras.

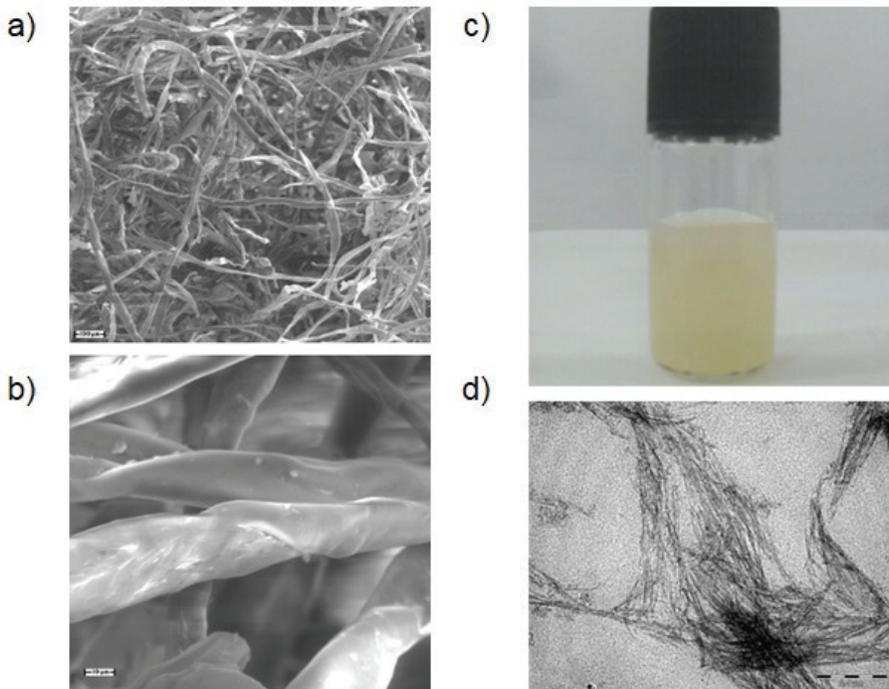


**Figura 1.** Objetos e comparação com a escala em nanômetros.  
Em destaque, parte do que denominamos “nanomundo”. (Lau et al., 2017)

Outro microscópio eletrônico muito comum e mais potente que o MEV é o de transmissão (MET). O microscópio eletrônico de transmissão é usado para visualizar amostras suficientemente finas (seções de partículas sólidas, partículas nanométricas, tecidos biológicos, moléculas etc.), as quais o feixe de elétrons pode atravessar, gerando uma imagem de projeção, com resolução de 0,3 a 0,5nm. É usado, entre outras coisas, para visualizar o interior das células (em seções finas), a estrutura das moléculas de proteína (contrastada pela sombra do metal), a organização das moléculas nos vírus e nos filamentos citoesqueléticos (preparados pela técnica de coloração negativa), e o arranjo de moléculas de proteína nas membranas celulares (por fratura por congelamento). Além destes, os desenvolvimentos mais recentes e notáveis em microscopia são o microscópio de varredura por tunelamento e o microscópio de força atômica.

Como exemplo de uso da microscopia eletrônica, apresenta-se a obtenção e caracterização dos nanocristais de celulose. Nanocristais de celulose (NCCs) são nanomateriais de alta razão de aspecto (L/D) facilmente obtidos de microfibrilas de celulose por meio de forte hidrólise ácida. Eles apresentam propriedades únicas decorrentes da química da superfície, da cristalinidade e da

estrutura tridimensional. Os NCCs têm sido estudados para diversas aplicações, como revestimentos opticamente ativos, materiais nanocompósitos de reforço de estruturas ou aerogéis. A determinação do tamanho e da forma dos nanocristais de celulose é um desafio importante e a microscopia eletrônica de transmissão (MET) é uma das ferramentas mais importantes para atingir esse objetivo. Devido às especificidades da geração de imagens por MET, os NCCs requerem atenção especial, pois este material tem baixa densidade, é altamente suscetível a danos pelo feixe de elétrons de alta energia e agregam-se facilmente. Na Figura 2 observa-se um exemplo de caracterização de nanocristais de celulose obtidos a partir de linter de algodão. Neste trabalho de Moraes et al. (2013) os autores obtiveram nanocristais de linter com uma razão de aspecto de 19, cristalinidade de 91% e alta hidrofiliicidade.

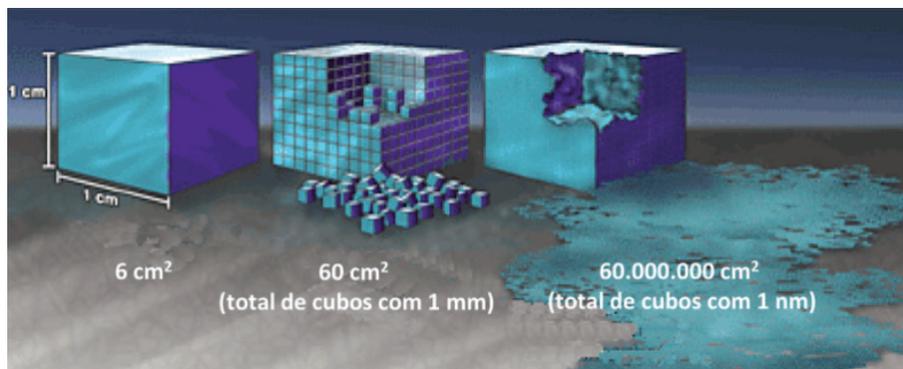


**Figura 2.** Linter de algodão, cv. Delta Opal: (a) imagem de MEV, escala 100 μm, (b) imagem de MEV, escala 10 μm, (c) suspensão de nanocelulose, e (d) imagem de MET de *nanowhiskers* de linter de algodão. (Moraes et al., 2013)

Portanto, “ver” o que era invisível e descobrir como é o comportamento de diversas estruturas nanométricas é a força motriz para entender a melhor forma de usá-las nesta “nova” escala. Desde então, todos os achados têm sido surpreendentes.

Um exemplo bem simples é dado para explicar porquê a nanoescala é tão especial. Se tomarmos um cubo de lado igual a 1 cm, a área superficial total deste cubo será  $6 \text{ cm}^2$ , ver exemplo na Figura 3. Entretanto, se cortarmos este mesmo cubo em vários outros, 10 vezes menores, teremos mil cubos com 1 mm de lado. A área superficial total passa a ter o valor de  $60 \text{ cm}^2$ . Reduzindo mais ainda cada um dos cubos de 1 mm de lado, para cubos com 1 nm (leia-se um nanômetro) de lado, a área superficial total é de  $60.000.000 \text{ cm}^2$  para o mesmo volume.

Quando um material é reduzido ao tamanho nano, devido a fenômenos peculiares que estes apresentam, baseados nos efeitos quânticos, este apresenta comportamento diferente e expressa algumas novas propriedades completamente ausentes em sua forma macrométrica. As nanopartículas (NPs) têm uma alta relação superfície / volume, o que aumenta muito sua reatividade superficial e possível atividade bioquímica, e apresentam, por exemplo, capacidade muitas vezes melhorada de troca iônica, liberação lenta e entrega localizada de nutrientes, características muito interessantes e de alta aplicabilidade em solos (Bandala e Berli, 2019).

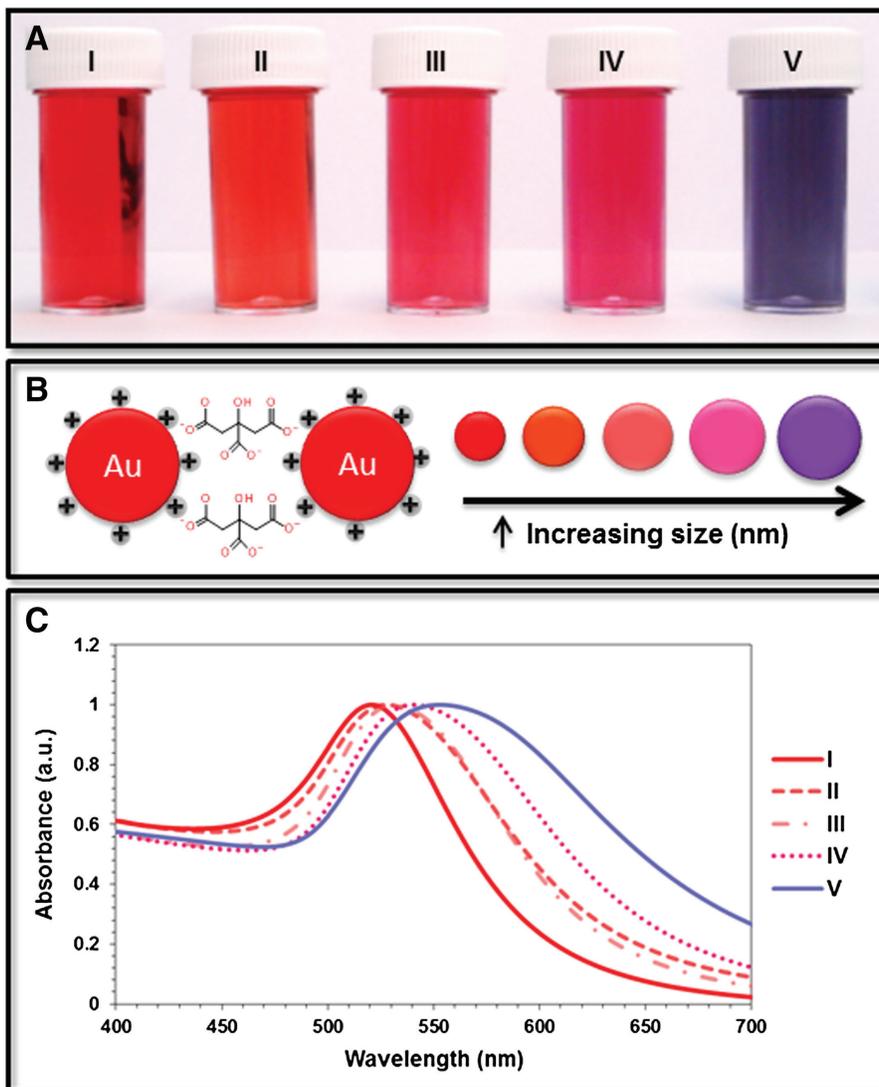


**Figura 3.** Exemplo mostrando o cálculo de área superficial de um cubo de acordo com o tamanho do lado. Quanto menor o lado de um cubo, considerando o mesmo volume, maior a área superficial. (Fonte: <https://www.nano.gov/nanotech-101/special>)

Então, quando 1 g de ouro é convertido em nanoescala, as partículas podem cobrir uma área de 100 km<sup>2</sup>. Nanopartículas de ouro (2,5 nm) são fundidas a temperaturas muito mais baixas (~ 300 °C) do que uma placa de ouro (1.064°C) (Serviço Geológico do Brasil, 2014). A absorção da radiação solar é muito maior em materiais compostos por nanopartículas do que em filmes finos. Estas mesmas NPs exibem um efeito tóxico nas bactérias, *Salmonella typhimurium*, enquanto micropartículas não (Wang et al., 2011). Da mesma forma, as nanopartículas de prata têm propriedades antibacterianas e antifúngicas que a prata na forma macro não tem. O mecanismo do efeito antimicrobiano da prata nanométrica em diferentes sistemas biológicos ainda permanece incompreensível, mas há diversas evidências de que, devido ao tamanho e, conseqüentemente, à elevada área superficial, as nanopartículas de prata podem destruir a membrana, atravessar o corpo de bactérias e criar danos intracelulares (Strohal et al., 2005; Franci et al., 2015; Konop et al., 2016).

Os efeitos quânticos, que explicam alguns comportamentos diferentes dos nanomateriais, são fascinantes e intensos. Devido a estes, é possível na nanoescala se fazer o “ajuste fino” de certas propriedades. Isto é, com o poder de sintetizar partículas de tamanhos variados, um cientista pode literalmente ajustar precisamente a cor fluorescente de uma nanopartícula e usar este fenômeno para identificá-la, e existem vários materiais que podem ser rotulados, para posterior identificação ou localização, com marcadores fluorescentes com múltiplos propósitos (Yao et al., 2014).

Por exemplo, nanopartículas de ouro não apresentam a cor amarela como nos é familiar. Na nanoescala, o ouro pode ser vermelho ou violeta, dependendo do tamanho das partículas dispersas no solvente, como mostra a Figura 4. A mobilidade dos elétrons de superfície das AuNPs nesta escala tão pequena é confinada. Devido à restrição no movimento, as NPs interagem de maneira diferente com a luz, quando comparadas a partículas de maior tamanho, tais como as micrométricas. Esta relação entre o tamanho de diversos nanomateriais e as propriedades ópticas pode ser útil em aplicações práticas, como em sensores baseados em nanopartículas, pois podem oferecer melhores limites de detecção ou maior sensibilidade na identificação de patógenos virais em plantas.



**Figura 4.** Suspensões contendo nanopartículas de ouro de diferentes tamanhos. (A) amostras de ouro coloidal I-V após redução com citrato de sódio; (B) a estabilidade é alcançada por repulsão eletrostática dos íons citrato ( $C_3H_5OCOO_3^{3-}$ ); e, (C) as cores indicam AuNPs de tamanhos diferentes nos espectros UV-vis para cada suspensão coloidal (Ajdari et al., 2017).

Em um meio físico, absorção e espalhamento são os processos básicos de interação entre a luz e os átomos e moléculas ali presentes. Um dos fenômenos observados na interação entre nanopartículas e fontes de luz é o de ressonância de plasmon de superfície (do inglês *Surface Plasmon Resonance-SPR*). O SPR surge quando a oscilação coletiva de elétrons condutores no metal, excitados pelo campo eletromagnético de uma fonte de luz, está em ressonância com a frequência de luz incidente. Uma excitação de SPR origina uma absorção de comprimento de onda seletivo com um largo coeficiente de extinção molar de aproximadamente  $3 \times 10^{11} \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ; uma dispersão de Rayleigh com eficácia equivalente a  $10^6$  fluoróforos; e um aumento do campo eletromagnético local na superfície das nanopartículas que é responsável pelo intenso sinal observado na espectroscopia Raman amplificada por superfície, ou espalhamento Raman. Este último bastante útil na caracterização de moléculas adsorvidas na superfície de nanomateriais quando estes são modificados durante a síntese para se tornarem alvo-ativos em algumas aplicações.

As nanopartículas conseguem exibir uma forte banda de absorção UV-vis que não é observável no espectro dos metais comuns. No ensaio de espectrofotometria UV-vis, a incidência de luz de diversos comprimentos de onda através de uma suspensão de nanopartículas metálicas vai gerar picos de absorção específicos dependentes do tamanho (fenômeno do SPR), forma e estado de agregação das NPs; do índice de refração da camada sobre a superfície destas, ou seja, se tem ou não moléculas aderidas nesta superfície; e do número de NPs que interagem com o feixe de luz incidente (concentração da suspensão coloidal), como na Figura 4c.

Nanopartículas de ouro estão entre as mais estudadas e utilizadas, devido à sua fácil preparação, estabilidade, funcionalização química superficial bem estabelecida e propriedades óptico-eletrônicas únicas (Anwar et al., 2019; Barik et al., 2008; He et al., 2019; Huang et al., 2018; Kah e Hofmann, 2014; Medina-Pérez et al., 2019; Pajerski et al., 2019; Prasad et al., 2017; Röder et al., 2019; Singh et al., 2010; Wang et al., 2011). Singh e colaboradores (2010) usaram imunossensores à base de nanopartículas de ouro que podiam detectar o carvão parcial do trigo (Karnal bunt), causada pelo fungo exótico *Tilletia indica*, doença alvo de medidas fitossanitárias no Brasil, usando SPR. A aplicação do sensor SPR na certificação de sementes e na quarentena de

plantas pode ser altamente eficaz devido à alta precisão na detecção de infecções nas plantas. A pesquisa de nanossensores para aplicação no campo em detecção de patógenos pode ser altamente valiosa para o diagnóstico rápido e gerenciamento de doenças.

O tunelamento de elétrons é outro conhecido e potente efeito quântico da nanoescala e é a base do desenvolvimento dos microscópios de varredura por tunelamento (ou STM, do inglês *Scanning Tunneling Microscope*) e as memórias *flash* utilizadas na computação. Os STMs funcionam com uma ponta metálica extremamente fina fazendo a varredura da superfície de uma amostra. Mantendo esta ponta metálica muito próxima da superfície da amostra e aplicando-se uma tensão elétrica na ponta ou na amostra é possível se obter uma imagem ou a topografia eletrônica desta superfície numa escala realmente pequena, inclusive, definindo a imagem de átomos individuais. A tensão aplicada na ponta metálica ou na amostra também permite a manipulação de átomos, ou seja, movê-los ao longo da superfície construindo-se uma nova estrutura em escala atômica, por exemplo. Portanto, além de produzir imagens em escala atômica, o microscópio de tunelamento permite a manipulação de átomos individuais (Kubota et al., 2003; Hipps e Scudiero, 2005).

Outro aspecto bem interessante em relação ao tamanho é o fato que a maioria dos processos biológicos ocorre na nanoescala, o que oferece aos cientistas modelos e moldes para imaginar e construir novos processos que podem melhorar o trabalho em desenvolvimento de fármacos, diagnóstico por imagem, computação, impressão, catálise química, síntese de materiais e muitos outros campos. As NPs podem ser menores do que uma partícula de vírus, como o influenza (80-120 nm de diâmetro) e o vírus do mosaico do tomate (300 nm de comprimento e 10-18 nm de diâmetro). E, ainda, devido ao seu tamanho nanométrico, NPs densas ou porosas podem carrear na superfície ou nos poros diversos compostos para o interior das células (Li et al., 2007). Além disso, as NPs apresentam morfologias diversificadas (esfera, bastões, prismas) e muitas vezes menores que as bactérias. Quando em suspensão, as NPs se deslocam, sem que haja precipitação, sob movimento browniano e sua velocidade de deslocamento dentro do solvente varia fortemente com o tamanho das partículas.

A nanotecnologia pode representar um grande impulso para a nova fronteira da agricultura moderna juntamente com outras áreas como a tecnologia da

informação, inteligência artificial, Internet das coisas e automação mecanizada, oferecendo aplicações potenciais (Khot et al., 2012; Prasad et al., 2017). Como está abordado no texto, a nanotecnologia tem um grande potencial para lidar com os desafios globais de produção e segurança de alimentos, sustentabilidade e mudanças climáticas, de acordo com os artigos científicos que tratam do assunto. Porém, são necessários maiores investimentos e troca de informação entre os pesquisadores e setor produtivo para que sua relevância alcance as condições de campo ou da rotina produtiva. Paralelamente, é necessário se discutir questões relacionadas à preocupação sobre destino, transporte, biodisponibilidade, toxicidade de nanopartículas e inadequação da estrutura regulatória que podem limitar a total aceitação e inclinação para a adoção de nanotecnologias no setor agrícola.

Trabalhar em escala tão diminuta não significa uma simples miniaturização. Como foi descrito, a nanoescala permite aos cientistas utilizar as propriedades físicas, químicas, mecânicas e ópticas únicas dos materiais, que ocorrem naturalmente em nanopartículas, e desenvolver as nanotecnologias. Tantas características interessantes fazem dos nanomateriais estruturas capazes de melhorar o desempenho em diversas aplicações médicas, mecânicas, computacionais e agropecuárias.

## Tipos de nanomateriais

De maneira simplificada, os nanomateriais podem ser divididos em três categorias: orgânicos, orgânicos / inorgânicos combinados ou híbridos (superfície modificada) e inorgânicos, como mostra a Figura 5. Nos últimos anos, todos esses materiais atraíram grande interesse. Os nanomateriais orgânicos são empregados em nanocápsulas para carrear vitaminas, antioxidantes, cores, sabores e conservantes aos alimentos ou em ração animal. A produção de argila orgânica é interessante para a fabricação de nanocompósitos de polímero / argila com propriedades físicas e mecânicas melhoradas (Singla et al., 2012). Os nanomateriais inorgânicos, como tal, são utilizados em alimentos e suplementos alimentares e quando incorporados em matrizes poliméricas são utilizados em embalagens. O uso desses diferentes nanomateriais no setor agro-alimentar / alimentar é descrito resumidamente.

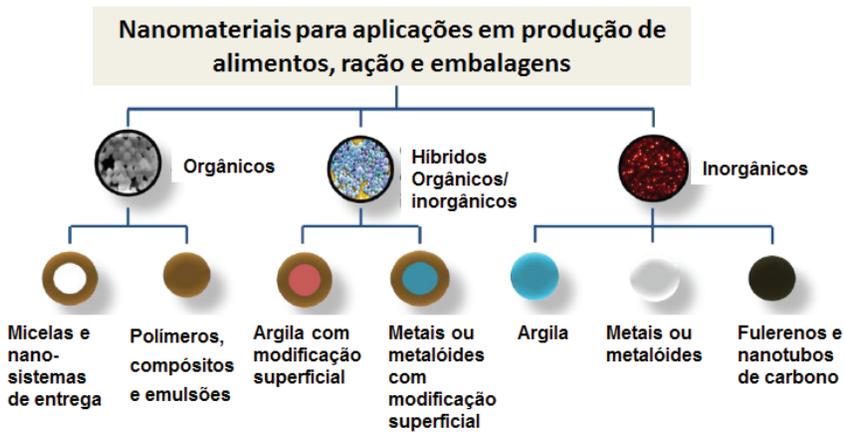


Figura 5. Exemplos de tipos de nanomateriais (RIKILT e JRC, 2014).

## Nanomateriais orgânicos

Uma importante área de aplicação de nanomateriais orgânicos é o encapsulamento de aditivos para alimentação, pesticidas e medicamentos veterinários. As chamadas nanocápsulas consistem geralmente em micelas, lipossomas ou nanoesferas e são compostos de materiais que geralmente são considerados seguros (Peters et al., 2011).

A síntese pode ser feita por métodos físicos, por exemplo, sonicação, agitação, evaporação e condensação ou por métodos químicos, por exemplo, emulsificação, polimerização, coacervação e hidrólise (Fernandes et al., 2014; Nuruzzaman et al., 2016). A escolha do método depende da aplicação, propriedades dos materiais e sua estabilidade. Em geral, três tipos de nanomateriais orgânicos podem ser utilizados para essas construções, nanomateriais à base de lipídios, proteínas e polissacarídeos. Os nanomateriais à base de lipídios estão entre os mais aplicados, pois podem ser produzidos com ingredientes naturais em escala industrial e têm a capacidade de encapsular compostos com diferentes solubilidades. Os nanomateriais à base de proteínas são frequentemente preparados usando uma abordagem *bottom-up*, a partir de estruturas elementares ou moléculas capazes de se automontar vai sendo montada a estrutura final, ou seja, de baixo para cima. Por exemplo, proteínas globulares, como as do soro de leite, têm a capacidade de formar

partículas com tamanhos de 40 nm, enquanto 95% das caseínas são naturalmente micelas automontadas com um diâmetro de 50 a 500 nm. Já os polissacarídeos são compostos de ocorrência natural em plantas (pectina, goma guar), animais (quitosana, sulfato de condroitina), algas (alginatos) e microrganismos (dextrano). Até onde se tem conhecimento, a quitosana, um polissacarídeo naturalmente biodegradável e biocompatível, e o amido parecem ser os polissacarídeos mais utilizados no desenvolvimento de nanomateriais para aplicações farmacêuticas e biomédicas.

Vários ingredientes como vitaminas, antioxidantes, cores, sabores e conservantes, e, também, pesticidas e medicamentos veterinários podem ser encapsulados nesses nanomateriais, melhorando assim a estabilidade, a proteção contra degradação prematura e a biodisponibilidade de substâncias ou ingredientes que têm baixa estabilidade, solubilidade ou biodisponibilidade intrínseca. As características ópticas únicas dos materiais nanoencapsulados significam que eles podem ser usados em uma ampla gama de produtos, especialmente bebidas transparentes. O aperfeiçoamento de propriedades, como a biodisponibilidade e absorção, abriu um leque de aplicações em produtos alimentícios e suplementos que incorporam vitaminas, nutracêuticos, antimicrobianos, antioxidantes etc. quando administrados em escala nanométrica.

## **Nanomateriais combinados orgânicos/ inorgânicos (híbridos)**

Nanomateriais orgânicos e inorgânicos combinados, também chamados de nanomateriais híbridos, são nanomateriais que adicionam certos tipos de funcionalidade à matriz, como atividade antimicrobiana ou uma ação conservante pela absorção de oxigênio. Em embalagens de alimentos, nanomateriais funcionalizados são incorporados na matriz polimérica para oferecer resistência mecânica ou uma barreira contra gases, componentes voláteis (como sabores) ou umidade. Um exemplo é o uso de nanoargilas funcionalizadas em embalagens de com propriedades aprimoradas de barreira a gás. O nanomineral mais utilizado é a montmorilonita; argila natural obtida de cinzas/rochas vulcânicas (também denominada bentonita). A organo-argila possui uma estrutura de camada natural muito fina, nanométrica, e é organicamente modificada para se ligar às matrizes poliméricas (Betega de Paiva et al., 2008).

## Nanomateriais inorgânicos

Sabe-se que apenas um número limitado de nanomateriais inorgânicos é usado em aplicações da indústria de alimentos, aditivos, suplementos e embalagens para alimentos ou na agricultura, embora alguns deles possam ser usados em grandes volumes e em várias aplicações diferentes (RIKILT e JRC, 2014). Os nanomateriais que são mais comumente empregados em nanotecnologias incluem prata, ferro, cálcio, magnésio, selênio, silicatos e dióxido de titânio. A embalagem de alimentos é a principal área de aplicação de nanomateriais inorgânicos e inclui combinações com polímeros (como descrito na seção anterior), como barreira à penetração de gás; NPs de prata e de óxido de zinco para atividade antimicrobiana; e dióxido de titânio para proteção ultravioleta. As NPs de sílica são usadas para compor o revestimento superficial de materiais de embalagem. Embora a prata tenha o número de aplicações que mais cresce, não é em volume o material mais utilizado. É usada em suplementos alimentares, embalagens, caixas de armazenamento e refrigeradores como antimicrobiano. O banco de dados Woodrow Wilson lista cerca de 40 aplicações de prata em alimentos e produtos relacionados, a maioria deles em suplementos alimentares (Woodrow Wilson, 2012). Mais recentemente, a prata tem sido estudada como uma alternativa aos antibióticos utilizados na produção de aves (Elkloub et al., 2015).

## Aplicação de nanomateriais na produção agropecuária

E exemplos de inovação no agronegócio, envolvendo a nanobiotecnologia, são inúmeros. Na presente abordagem serão apresentados principalmente os exemplos que dizem respeito à nanobiotecnologia aplicada ao controle de pragas e doenças na agropecuária e alguns relacionados à fertilizantes, casos em que há um número considerável e crescente de patentes, publicações e citações na Web. Os novos produtos, desenvolvido ou em desenvolvimento, podem revolucionar a agricultura dos tempos modernos, já que há consenso de que de maneira geral, o controle de pragas e doenças é deficiente. Na maioria dos casos, as pragas desenvolvem resistência aos produtos químicos convencionais e a corrida evolutiva continua, lançando novos desafios à indústria de insumos agropecuários (Kah e Hofmann, 2014).

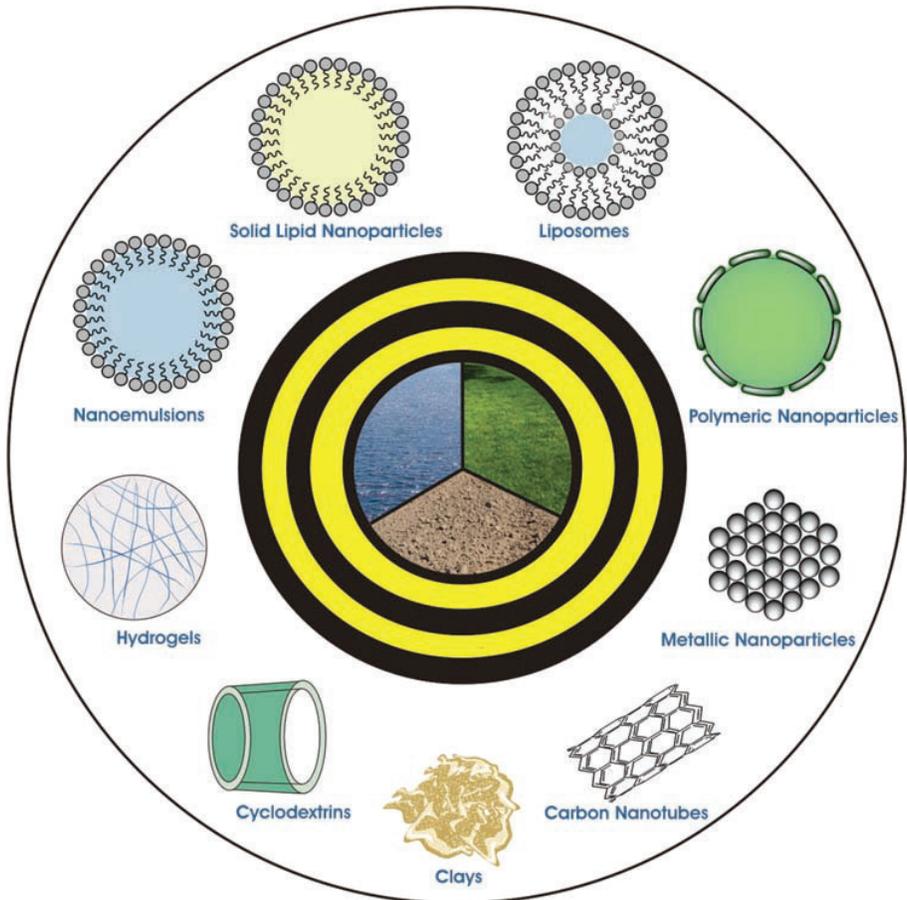
Durante a produção primária, os agroquímicos nano-formulados ou os nanopesticidas, como têm sido denominados, são projetados com o objetivo de aumentar a eficácia das formulações em comparação com as convencionais. Por exemplo, nanopartículas lipídicas sólidas e nanocápsulas poliméricas são investigadas para a combinação e entrega de formulações fungicidas pouco solúveis com o objetivo de reduzir perdas por lixiviação e toxicidade no ambiente e nos seres humanos (Campos et al., 2015). A aplicação de novas técnicas de nanotecnologia na agricultura pode ser dividida em três categorias principais: pesticidas, fertilizantes e aditivos para ração animal. A maioria dos resultados de pesquisa nestas categorias lida com nanomateriais orgânicos, seguidos por dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), prata, sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Os nanomateriais apresentados nestes resultados são descritos em formas diversas (frequentemente  $> 100$  nm, apesar do conceito nano abranger partículas de 1 a 100 nm), desde partículas sólidas dopadas até estruturas de polímeros (geralmente não persistentes no ambiente) e estruturas à base de óleo e água, ou nanoemulsões.

Pesticidas são substâncias químicas destinadas a prevenir, destruir ou mitigar pragas. A nanotecnologia tem demonstrado um grande potencial de melhorar as estratégias de manejo de pragas através das formulações de pesticidas à base de substâncias ou formulações nanoencapsuladas (RIKILT e JRC, 2014; Nuruzzaman et al., 2016). Há diversos trabalhos mostrando este potencial. E os resultados interessantes obtidos em pesquisas acadêmicas nas últimas décadas foram seguidos de perto por várias empresas. Algumas empresas na última década, como Syngenta, Bayer, Monsanto, Sumitomo, BASF e Dow Agrosiences, já depositaram várias patentes diferentes, compreendendo uma ampla gama de protocolos para produção e aplicação de formulações encapsuladas, que podem ser usadas para produzir nanoinseticidas. Perlatti e colaboradores (2013) apresentaram uma revisão com diversos exemplos de nanoformulações e a indicação da patente correspondente. Os autores também afirmaram que, embora já existisse um volume de trabalho considerável e alto investimento até aquele momento, nenhuma formulação comercial de nanoinseticida tinha sido extensivamente comercializada até 2012 e a maioria das aplicações ainda está em estágio de desenvolvimento (Perlatti et al., 2013; RIKILT e JRC, 2014).

A deficiência no controle de pragas e doenças pelos agroquímicos ou os níveis baixos de fertilização se dá por perdas já na aplicação dos defensivos ou fertilizantes convencionais. As perdas podem ser devido à volatilização, à degradação por fotólise, hidrólise ou atividade microbiológica, ou pelas condições ambientais durante a aplicação: velocidade do vento, umidade e altas temperaturas, que favoreçam a evaporação dos ingredientes ativos. Dessa maneira, a concentração pode ser muito reduzida, ficando abaixo da mínima efetiva antes mesmo do produto alcançar o alvo de ação. Consequentemente, aumenta-se muitas vezes a concentração dos ingredientes e a repetição das aplicações, provocando elevados impactos econômicos e ambientais negativos, além dos riscos à saúde humana. Portanto, as maiores motivações para o desenvolvimento de formulações de liberação mais lenta e/ou dirigida incluem a redução do impacto ambiental negativo destes insumos pelas taxas mais reduzidas de aplicação, devido às menores perdas dos agroquímicos por degradação, lixiviação e/ou volatilização, e a segurança do aplicador.

A fim de evitar perdas, propõem-se novas rotas de entrega de pesticidas e fertilizantes nas plantas e, de acordo com a literatura, as oportunidades são de uso de pesticidas e fertilizantes na nanoescala (Bhattacharyya et al., 2010; Nair et al., 2010; Gogos et al., 2012; Gopal et al., 2012; Rai e Ingle, 2012; Bhagat et al., 2013; Sekhon, 2014). A nanotecnologia contribui para minimizar estas perdas graças às particularidades de propriedades estruturais dos materiais na nanoescala, como discutidas anteriormente. Processos químicos de síntese permitem a obtenção, por exemplo, de emulsões mais estáveis ou nanoestruturas que recobrem melhor as folhas das plantas, que podem reduzir muito as taxas e aumentar a precisão das aplicações, a proteção contra a degradação por raios ultravioleta e liberação controlada de substâncias (Fernandes et al., 2014).

Nesse sentido, como já mencionado anteriormente, nanoestruturas de materiais orgânicos, inorgânicos ou a combinação destes, como polímeros biodegradáveis, nanopartículas metálicas, sílica mesoporosa, etc., preparadas com ingredientes ativos químicos ou biotecnológicos foram desenvolvidas para uso na área agrícola. Em muitos casos, o processo de preparação é chamado nanoencapsulação e o produto final é chamado de nanodispersão, nanoemulsão ou nanocarreador, pois transporta um ingrediente ativo. Alguns desses nanocarreadores estão ilustrados na Figura 6 e podem ajudar a aumentar a estabilidade físico-química ou modificar a liberação de compostos no ambiente (Grillo et al., 2016).



**Figura 6.** Representação esquemática de várias nanoestruturas carreadoras que possibilitam a interação com o meio ambiente através do solo, água e vegetação (Grillo et al., 2016).

As nanocápsulas ou nanocarreadores, quando aplicadas no campo, são espalhadas uniformemente sobre a superfície de folhas de plantas e solo e vão, lentamente e eficientemente, liberando as moléculas inseticidas, do seu interior, para a planta (De Oliveira et al., 2014; Fernandes et al., 2014; Nuruzzaman et al., 2016; Grillo et al., 2016). A associação de agroquímicos com nanomateriais aumenta a área da superfície de contato entre o ingrediente ativo e o alvo especificado (folha, inseto, solo) e, por consequência, a

reatividade, porque uma determinada concentração do pesticida é distribuída em nanocápsulas. Os mecanismos de liberação das nanocápsulas incluem difusão, dissolução, biodegradação e pressão osmótica em pH específico. Dessa forma, o ingrediente ativo pode, por exemplo, ser facilmente engolido por insetos na mastigação (Rai e Ingle, 2012; Sengani et al., 2017). Estas nanoestruturas são também absorvidas pelas camadas de cera cuticular (lipídica) de insetos, via processo de fisissorção, e podem romper a barreira de proteção de água, resultando na morte do inseto por dessecação (Barik et al., 2008).

Este mesmo processo pode ser usado para encapsular, proteger e entregar DNA ou outras moléculas químicas no interior de células vegetais e, igualmente, promover a proteção de plantas contra pragas ou a transformação genética. O mesmo princípio pode ser utilizado no aumento de desempenho de vacinas de DNA, em que se esperam níveis mais elevados de transfecção (introdução deliberada de ácidos nucleicos) pela proteção do DNA, conferida pelas nanocápsulas, até a entrega deste no interior de células animais. Os ácidos nucleicos carregados pelo nanomaterial penetram a parede celular em maior quantidade e, por isso, aumentam a eficiência dos processos de transformação genética ou transfecção e, conseqüentemente, melhoram o desempenho esperado para a vacina de DNA (Bozkir e Saka, 2004; Wang et al., 2018). Portanto, a saúde animal é outra grande área de aplicação das nanoestruturas com o objetivo de potencializar o desempenho de vacinas, tratamento de doenças e de métodos de diagnóstico rápido, além do uso de imunossensores hormonais no manejo da reprodução (Gopi et al., 2017).

Como exemplo de nanopesticida em desenvolvimento tem-se a nanoemulsão à base de surfactante que foi descrita por Wang e colaboradores (2017) como um sistema de entrega para o piretróide beta-cipermetrina, insolúvel em água. E, também, nanoestruturas de sílica mesoporosa e nanomateriais modificados superficialmente são sintetizados para liberação controlada do pesticida validamicina. Escolhido como modelo de pesticida solúvel em água, a validamicina foi carregada com sucesso em nanopartículas porosas e ocas de sílica, onde o interior dos poros era de cerca de 80 nm e a espessura da casca de cerca de 15 nm, com uma capacidade de carga de 36% em peso por um método de carregamento de fluido supercrítico. A adsorção de valida-

micina ocorreu por toda a superfície livre (área externa, interna e poros) das nanopartículas, o que levou a diferentes taxas de liberação em água desionizada e em diferentes estágios. Uma alta taxa de liberação inicial pode satisfazer a necessidade imediata de tratamento após a administração do pesticida, enquanto a liberação sustentada nos estágios posteriores alcançará um tratamento contínuo por longo tempo. Essa liberação também dependia das condições do meio de dissolução e foi acelerada pelo aumento do pH ou da temperatura (Liu et al., 2006).

Outro exemplo é o de Suresh Kumar e colaboradores (2013). Eles estudaram as atividades larvicidas da nanopermetrina e permetrina, pesticida químico, contra *Aedes aegypti* por dispersão em água. A conclusão foi que a preparação de um pesticida insolúvel em água, permetrina, na forma de uma nanoemulsão prolonga significativamente a atividade pesticida e também melhora a especificidade. A formulação de nanopermetrina requer menos pesticida, elimina a necessidade de usar solventes orgânicos voláteis na formulação e apresenta um método muito mais “verde” para o controle de pragas. Nas espécies-alvo testadas, a permetrina nanomodificada causou uma resposta tóxica maior em menor concentração em todos os períodos observados em comparação à permetrina usada de forma convencional.

A formulação de nanopesticidas, inclusive na linha “mais verde”, tem como objetivo essencialmente importante a redução do potencial de danos ao meio ambiente, somando benefícios à sustentabilidade dos setores produtivos. Nesta linha, os potenciais candidatos incluem os ingredientes ativos de ocorrência natural, tais como os feromônios e os óleos essenciais (fitoterápicos), que se tornam potencialmente mais ativos e seguros quando combinados com polímeros biodegradáveis ou outros materiais nanoestruturados (Abreu et al., 2012). Os feromônios são compostos químicos voláteis secretados por algumas espécies de insetos e ajudam na comunicação entre os indivíduos da espécie. Se, por exemplo, feromônios forem combinados com alguns polímeros biodegradáveis formando um nanogel, o produto gerado pode ser usado para atrair e capturar a mosca-das-frutas em armadilhas simples. Para se conseguir um nanogel quimicamente, termicamente e mecanicamente estável, usam-se técnicas avançadas baseadas em princípios supramoleculares e nanotecnologia. Esta nanoestrutura reduz consideravelmente a evaporação do feromônio, que é altamente volátil, além de fornecer proteção contra

os efeitos de degradação do ambiente, tais como: o ar, água e a luz solar. Sem esta proteção, o feromônio é evaporado em menos de três semanas, ao passo que, a mesma concentração aprisionada na estrutura do nanogel pode apresentar atividade por até 30 semanas sob condições de campo (Bhagat et al., 2013).

Outra abordagem promissora nesta linha é a de desenvolvimento de sensores capazes de detectar quantidades mínimas de feromônios e compostos naturais. Steffens e colaboradores (2014f) construíram um nanossensor baseado na funcionalização de um microcantilever de microscópio de força atômica (*Atomic Force Microscopy* - AFM) com um polímero condutor, a polianilina (PANI), para a detecção do feromônio 2-heptanona. Esse hormônio é muito significativo para as abelhas, que o liberam como uma marcação repelente para evitar inimigos e outras abelhas (Steffens et al., 2014).

A nanotecnologia pode não apenas proteger culturas e produtos alimentares das pragas, mas também aumentar a produção e a qualidade das culturas (Khalifa e Hasaneen, 2018). Os fertilizantes na forma de nanoemulsões são usados para aumentar a eficácia dos ingredientes ativos ou reduzir potencialmente a quantidade que devem ser aplicados. Um exemplo disso é um fertilizante de liberação lenta, que carrega maiores vantagens em relação aos fertilizantes convencionais, como uma diminuição na taxa de perda de fertilizantes, sustentabilidade do suprimento de nutrientes e redução da frequência de fertilização e minimizar os impactos negativos no uso de sobredosagem de fertilizantes. Um dos métodos mais eficazes para liberar nutrientes para as culturas agrícolas, de maneira controlada e na forma de solução é o uso de hidrogéis (Helmiyati e Syarifudin, 2018; Nascimento et al., 2018). Os hidrogéis são polímeros superabsorventes ou compostos hidrofílicos com uma estrutura de rede tridimensional que podem absorver e reter uma grande quantidade da solução aquosa. Estas estruturas podem absorver de 100 a 1000 vezes a sua massa, mesmo sob pressão intensa. Uma das mais importantes aplicações de hidrogéis é a melhoria do solo e o apoio à agricultura e à engenharia ambiental na recuperação da vegetação. Atualmente, com a escassez de água envolvendo estresse hídrico, o uso está se tornando ainda mais comum para retenção de umidade no solo (Gao et al., 2016; Helmiyati e Syarifudin, 2018; Nascimento et al., 2018).

Ainda segundo o *Nano Inventory* (RIKILT e JRC, 2014), um inventário das atuais e potenciais aplicações futuras da nanotecnologia no setor agroalimentar / alimentar, nenhum aditivo alimentar aplicado foi identificado e, até 2014, parecia haver apenas um número limitado de nanomateriais em desenvolvimento para aditivos alimentares. Neste levantamento, foi identificado que os nanomateriais estão sendo desenvolvidos e testados quanto à eficácia para substituir antibióticos, absorver bactérias e toxinas e melhorar a digestibilidade dos alimentos.

Neste sentido, acredita-se que nanopartículas de prata (AgNPs), de propriedade antimicrobiana conhecida, tenha um efeito semelhante aos antibióticos usuais e, devido a isso, pode ser adicionado à água potável para produção de aves (Elkloub et al., 2015) e suínos (Fondevila et al., 2009). Elkloub et al. (2015) realizaram um estudo para investigar o efeito das nanopartículas de prata (AgNPs) no crescimento, características da carcaça, sangue e no conteúdo microbiano do ceco (contagem total de *Escherichia coli* e *Lactobacillus*) em frangos de corte. Eles mostraram que as aves que receberam AgNPs a uma dose de 4 ppm/kg de ração tiveram um número reduzido de bactérias nocivas, como *E. coli*, enquanto que sobre a microflora, representada como *Lactobacillus* spp, não tiveram efeito benéfico. Outro exemplo que pode ser citado, são os estudos in vitro realizados por Duffy e colaboradores (2018) sobre a eficácia de AgNPs e NPs de óxidos, como o óxido de cobre (CuO) e zinco (ZnO) contra bactérias do gênero *Campylobacter*, responsáveis por infecções intestinais bacterianas de origem alimentar. Este estudo também confirmou a eficácia do óxido de zinco (ZnO) contra cepas de *Campylobacter* originárias de aves e o efeito antibacteriano das AgNPs e ZnO contra cepas de *Salmonella* provenientes de aves da Austrália.

Na verdade, um elevado percentual, de 50% a 70% das infecções por bactérias do gênero *Campylobacter*, pode ser atribuído a produtos de carne de aves que foram contaminados com o conteúdo intestinal dos animais durante o processamento. Atualmente, não existem métodos práticos e eficazes para resolver este problema de segurança alimentar e uma das estratégias de interesse crescente está baseada na interação entre nanopartículas metálicas ou poliméricas e bactérias. Nanopartículas bioativas, preparadas para serem usadas em aditivos para ração animal, podem aderir às estruturas biomoleculares na superfície de campilobactérias e removê-las dos tratos in-

testinais das aves antes do processamento da carne (Stutzenberger et al., 2007; Di Gregorio et al., 2014; Nadziakiewicz et al., 2019). Latour e demais autores (2003) investigaram a capacidade de nanopartículas bioativas de se ligarem irreversivelmente a bactérias alvo, inibindo-as de se ligarem à parede intestinal e infectarem seus hospedeiros. Neste tipo de tecnologia, os materiais bioativos são funcionalizados com várias frações polissacarídicas e polipeptídicas selecionadas para promover a adesão aos microrganismos patogênicos portadores de adesina patogênica alvo (Stutzenberger et al., 2007). Desse modo, são formados grandes complexos aglomerados entre os enteropatógenos e as nanopartículas que podem ser facilmente eliminados do trato digestivo dos animais junto com outras matérias fecais antes do transporte e processamento para consumo humano. Neste tipo de estratégia não há a utilização de antibióticos, o que pode contribuir para minimizar os efeitos da resistência antimicrobiana pelo uso reduzido de antibióticos na produção de carne.

O efeito antimicrobiano de alguns nanomateriais, funcionalizados ou não, contra os principais patógenos preocupantes para a indústria avícola, indica que há oportunidades para esta indústria se beneficiar da nanociência (Anwar et al., 2019). O conhecimento da eficácia das nanopartículas contra esses patógenos importantes poderá e deverá ser incorporado ao desenvolvimento de futuras aplicações direcionadas, como engradados, correias transportadoras ou embalagens.

Portanto, um menor uso de antibióticos para tratar enfermidades de animais de produção ou na nutrição também pode ser proporcionado pela nanotecnologia, reduzindo custos de produção e o resíduo destes no alimento produzido.

Outro ponto importante é o da contaminação da ração animal por agentes patogênicos, o que representa um problema mundial para os produtores e pode causar doenças graves em animais de produção. A presença de fungos produtores de micotoxinas na alimentação de frangos, principalmente devido à contaminação da matéria prima, mais especificamente dos cereais, é um dos grandes problemas da produção avícola brasileira. As aflatoxinas são as principais micotoxinas a afetar a avicultura, são produzidas por fungos do gênero *Aspergillus*, sendo a aflatoxina B1 a mais tóxica (Bochio et al., 2011). Um nanocompósito ou nanoargila a base de montmorilonita pode

efetivamente sequestrar a toxina da ração, reduzindo a toxicidade da AF em aves de corte pela melhoria da aflatoxicose nestes animais. Os pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de estruturas deste tipo especificamente para absorver micotoxinas eventualmente presentes na ração e, assim, prevenir que entrem no trato gastrointestinal de animais e causem micotoxicose. Como exemplo específico cita-se Shi e colaboradores (2006) que testaram a eficácia de um nanocompósito de montmorilonita modificado para reduzir a toxicidade da aflatoxina (AF) em aves. Os resultados do estudo *in vivo* indicaram que o nanocompósito foi eficaz na redução dos efeitos inibidores do crescimento e no aumento do peso relativo dos órgãos (rins e fígado), produzidos pela AF no nível usado nos tratamentos. Também foi elucidado que o possível mecanismo de ação do nanocompósito foi o sequestro da toxina no intestino e a formação de um complexo de sorção estável, reduzindo a absorção gastrointestinal de toxinas e melhorando os efeitos adversos da AF nos animais jovens. Esses achados são importantes porque nanoargilas podem ser desenvolvidas para serem incorporadas na alimentação animal como um novo aditivo para prevenir doenças, como a aflatoxicose.

Também, vale destacar a linha de pesquisa com a nutrição animal suplementada com minerais. Os minerais desempenham um papel vital na nutrição dos sistemas de produção animal, pois são utilizados para realizar processos digestivos e reprodutivos. A biodisponibilidade de minerais de suas fontes inorgânicas é bastante baixa, portanto esses minerais são adicionados 20 a 30 vezes mais do que o requisito normal dos animais, o que pode levar à excreção excessiva desses minerais nas fezes, resultando em poluição ambiental e pode afetar o equilíbrio de outros minerais. A interação entre dois minerais ou mais pode reduzir a biodisponibilidade. Os nanominerais melhoram a biodisponibilidade de minerais no organismo dos animais devido ao aumento da área superficial, maior atividade superficial, alta eficiência catalítica e maior capacidade de adsorção, e por isso têm recebido a atenção por parte da comunidade científica em trabalhos que visam avaliar o crescimento, a produção e o estado geral de saúde dos animais com dietas suplementadas por nanopartículas. Além disso, a técnica de nanoencapsulação evita a interação mineral-mineral ou mineral-nutriente e aumenta sua disponibilidade. No entanto, estudos que explicam o papel dos nanominerais como complemento alimentar no desempenho dos animais ainda são escassos.

Dos estudos disponíveis nota-se que o uso de nanominerais em ração animal é promissor, pois, como é descrito por muitos autores, neste tamanho a absorção do aditivo pelos ruminantes é aumentada, reduzindo efeitos antagônicos, por exemplo, entre cátions bivalentes (Shi et al., 2011; Bunglavan et al., 2014, Swain et al., 2015). Shi e colaboradores (2011) avaliaram a digestibilidade dos alimentos, a fermentação ruminal e os derivados da purina na urina de ovinos depois que os animais foram alimentados com dieta suplementada com selênio na forma de partículas nanométricas (nano-Se, um pó de cor laranja), com diâmetro variando entre 60 e 80 nm. Eles observaram que houve diminuição significativa do pH ruminal e da concentração de amônia e aumento na concentração total de ácidos graxos voláteis com o aumento da suplementação de nano-Se na dieta. Os autores concluíram que a suplementação de 3ppm de nano-Se na dieta basal de ovinos melhora a fermentação ruminal e a utilização de ração e que este nano-aditivo pode estimular a atividade microbiana do rúmen.

## Considerações sobre segurança dos produtos nanotecnológicos

Os nanomateriais estão sendo amplamente aplicados em todas as áreas da indústria de alimentos desde a agricultura, processamento, armazenamento e transporte até o nosso prato. Os resíduos neste caso, assim como os que não contêm nanomateriais, serão descartados no meio ambiente e provocarão impactos específicos na flora, fauna e ecossistemas (Prasad et al., 2017; Bundschuh et al., 2018). Infelizmente, pouca informação acerca do assunto está disponível. E, infelizmente, métodos de descarte adequados ainda não foram mencionados por pesquisadores, empresas de alimentos ou agências governamentais pelo mundo. Além disso, os dados de toxicidade *in vivo* de nanomateriais são muito escassos, especialmente o potencial efeito crônico nos órgãos humanos.

A crescente dependência de pesticidas e fertilizantes químicos durante e após a Revolução Verde gerou sérios problemas relacionados à sustentabilidade, impacto ambiental e riscos à saúde (Mishra et al., 2017). Como resultado, a abordagem inovadora do uso de biofertilizantes / biopesticidas ecológicos como uma alternativa aos agroquímicos surgiu para garantir a biossegurança

(Mahanty et al., 2017). No entanto, essa interessante abordagem também incluiu alguns dos principais problemas tais como o curto período de validade, baixa estabilidade no campo, desempenho sob condições ambientais flutuantes e, mais importante, a alta dose necessária para a área de cobertura máxima. Surpreendentemente, as formulações baseadas em nanopartículas têm mostrado superioridade sobre as bioformulações em termos de enfrentar todas essas questões como os diversos exemplos apresentados neste texto. Como resultado, a agricultura moderna deve adotar a abordagem inovadora da nanotecnologia para combater os desafios globais da produção agrícola, segurança alimentar, sustentabilidade e mudanças climáticas (Nair et al., 2010; Nuruzzaman et al., 2016; Rai e Ingle, 2012).

As vantagens econômicas têm sido mostradas nos inúmeros produtos já disponíveis e são indiscutíveis e outras devem surgir e serem demonstradas cada vez mais úteis com o pleno desenvolvimento dos produtos nanotecnológicos. Por outro lado, tem-se em elevada consideração a preocupação com a segurança dos nanomateriais em relação ao meio ambiente e para quem os manipula. Isto requer uma compreensão aprofundada das suas propriedades, dos comportamentos e das suas potenciais aplicações, de modo a desenvolver metodologias e controles de avaliação de risco adequados, baseados em uma ciência fundamentada no mais alto rigor metodológico e respeito à vida. Mundialmente se discute a regulação para o uso dos nanomateriais.

No Brasil, várias discussões começaram a ser realizadas a partir de 2009, pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, com a criação de grupos de trabalhos sobre o tema. Porém, ainda não há previsão de mudança da legislação que inclua essa temática.

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), em cooperação com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e o Ministério da Saúde (MS), são os principais responsáveis pela regulamentação de alimentos no Brasil. Os produtos alimentícios são regulamentados de acordo com vários documentos legais emitidos pelo Governo Federal e, para serem implementados, devem ser publicados no Diário Oficial do Brasil. Nenhuma legislação específica sobre nanomateriais foi encontrada no Brasil. Mesmo não existindo legislação específica, as várias leis, decretos, normas e mesmo a Constituição Brasileira já apresentam elementos que protegem a sociedade e o meio ambiente de eventuais desvios e danos do desenvolvimento nanobiotecnológico.

Dentre as iniciativas mundiais para a padronização dos ensaios de segurança, destaca-se a do consórcio europeu NANOReg (*A common European approach to the regulatory testing of Manufactured Nanomaterials*) que visa responder questões internacionais de regulamentação em nanotecnologia. Em setembro de 2014, o Comitê Interministerial de Nanotecnologia (CIN) aprovou a adesão do Brasil ao projeto europeu NANOReg com o objetivo de fornecer às agências reguladoras e aos legisladores do Brasil as ferramentas necessárias para que se tenha uma regulamentação em nanotecnologia embasada em conhecimentos científicos, em consonância com a regulamentação mundial e que dê segurança a trabalhadores, consumidores e ao meio-ambiente.

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) exerce a liderança científica e tecnológica do projeto atuando em conjunto com os laboratórios do SisNANO, com as Redes de Pesquisa em Nanotoxicologia e Nanoinstrumentação e com importantes pesquisadores na área de nanotoxicologia. Oito laboratórios brasileiros contribuem para cinco dos sete pacotes de trabalho propostos pelo NANOReg, sendo o Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA) da Embrapa um deles.

Ao assumirmos que a Embrapa e a sua Rede Agronano (Rede de pesquisa Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio) compõem um dos grandes atores mundiais no desenvolvimento de produtos nanotecnológicos para o agronegócio, torna-se importante estarmos tecnicamente preparados para gerar respostas a questionamentos nacionais e internacionais relativos à saúde e segurança de seus produtos.

## Conclusão e perspectivas futuras

A nanotecnologia é uma área promissora de pesquisa interdisciplinar que abre caminhos largos em diversos campos, como medicina, farmacêutica, eletrônica e agricultura. Este artigo apresenta o potencial dos diversos materiais e estruturas na agricultura e reúne parte da literatura relevante para o uso de nanopartículas como pesticidas, fertilizantes, herbicidas, agentes genéticos e de transferência de drogas, agentes melhoradores do solo, sem, contudo, esgotar o assunto.

O uso intensivo de agroquímicos, especialmente pesticidas, chama a atenção de toda a sociedade, inclusive da academia. Sem o devido controle, esses agentes podem poluir o meio ambiente e representar um perigo para os seres vivos. Não basta somente recriminar o uso inadequado, mas oferecer alternativas viáveis para continuarmos avançando em ganhos de produtividade na agricultura. Essa é uma das nossas responsabilidades como instituição de pesquisa agropecuária.

Neste aspecto, a nanotecnologia é uma abordagem recente que está se tornando cada vez mais importante para o fornecimento de agroquímicos e sua aplicação segura e mais eficiente.

De todos os vários tipos de nanotecnologias relacionados à liberação de pesticidas, foram apontadas tendências intrínsecas à técnica de nanoencapsulação. Diferentes materiais já mostraram seu potencial, resultados e aplicações promissores, encapsulando os pesticidas disponíveis. Entre eles, polímeros, sílica porosa, argila, hidrogéis e quitosana são considerados muito interessantes para estudo. Das amplas aplicações potenciais das técnicas de nanoestruturas para a liberação de agroquímicos, o desenvolvimento de uma propriedade de liberação lenta com maior solubilidade, permeabilidade e estabilidade é o foco principal da pesquisa atual. Essas propriedades são alcançadas por meio da proteção dos ingredientes ativos encapsulados contra degradação prematura ou aumentando sua eficácia no controle de pragas por um período mais longo. Embora recursos completos (por exemplo, síntese, eficácia e destino) relacionados a esses nanomateriais raramente sejam encontrados e as tecnologias de agroquímicos nanoencapsulados estejam em um estágio muito inicial de desenvolvimento, espera-se que essa tecnologia reduza, primeiro, a dosagem de pesticidas necessária para proteção das culturas e, segundo, a exposição humana a eles.

Há também, estudos mostrando que as nanopartículas mais comumente usadas, como as de sílica e outros óxidos, as de quitosana e as metálicas, têm o potencial de revolucionar a tecnologia existente usada em vários setores, como agricultura e biotecnologia de plantas. O direcionamento de biomoléculas mediado por nanopartículas de sílica seria útil para o desenvolvimento de novas cultivares resistentes a vários fatores bióticos e abióticos. Essas nanopartículas podem fornecer alternativas mais “verdes” e ecológicas para vários fertilizantes químicos, com menor impacto à natureza.

As pesquisas futuras devem ser enfatizadas no sentido de buscar formas de contornar os fatores de risco associados ao uso de nanopartículas. Estudar a síntese de nanopartículas e oferecer poucas aplicações, limitadas apenas às condições de laboratório, não poderia contribuir para a aceitação completa da nanotecnologia no setor agrícola. Portanto, a comunidade científica deve trabalhar em conjunto para melhorar as pesquisas futuras sempre com base em uma abordagem mais realista, com aplicação em condições de campo.

A validação do nível permitido de dose de nanopartículas dentro dos limites de segurança deve ser explorada e esclarecida. Isso pode ser conseguido através da tentativa de estudo dependente da concentração no sistema natural do solo, a fim de entender a dose precisa e ativa e não tóxica das nanopartículas.

## Referências

Abreu, F. O. M. S. et al. Chitosan/cashew gum nanogels for essential oil encapsulation. **Carbohydrate Polymers**, v. 89, n. 4, p. 1277–1282, 2012.

Ajdari, N. et al. Gold nanoparticle interactions in human blood: a model evaluation. **Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine**, v. 13, n. 4, p. 1531–1542, 2017.

Anwar, M. I. et al. Nutritional and immunological effects of nano-particles in commercial poultry birds. **World's Poultry Science Journal**, v. 75, n. 2, p. 261–272, 2019.

Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority (APVMA). Nanotechnologies for pesticides and veterinary medicines: regulatory considerations - Final report, 2015. [Internet]. Disponível em: <https://apvma.gov.au/node/15626>. [acesso em 10 jan. 2020].

Bandala, E. R., Berli, M. Engineered nanomaterials (ENMs) and their role at the nexus of Food, Energy, and Water. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2(1), p. 29-40, 2019.

Barik, T. K.; Sahu, B.; Swain, V. Nanosilica—from medicine to pest control. **Parasitology Research**, v. 103, n. 2, p. 253–258, 2008.

Betega De Paiva, L.; Morales, A. R.; Valenzuela Díaz, F. R. Organoclays: Properties, preparation and applications. **Applied Clay Science**, v. 42, n. 1–2, p. 8–24, 2008.

Bhagat, D.; Samanta, S. K.; Bhattacharya, S. Efficient management of fruit pests by pheromone nanogels. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1, p. 1294, 2013.

Bhattacharyya, A. et al. Nano-particles - A recent approach to insect pest control. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 24, p. 3489–3493, 2010.

Bochio, V. et al. Efeitos da aflatoxina na produção avícola: Revisão. **Pubvet**, v. 11, n. 8, p. 832–839, 2017.

Bozkir, A.; Saka, O. M. Chitosan Nanoparticles for Plasmid DNA Delivery: Effect of Chitosan Molecular Structure on Formulation and Release Characteristics. **Drug Delivery: Journal of Delivery and Targeting of Therapeutic Agents**, v. 11, n. 2, p. 107–112, 2004.

Brasil. Ministério da Saúde. Agrotóxicos na ótica do Sistema Único de Saúde [Internet]. Brasília: Ministério da Saúde, 2018. v. 1. t. 2 Relatório Nacional de Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Agrotóxicos. Disponível em: [http://bvsmis.saude.gov.br/bvsmis/publicacoes/relatorio\\_nacional\\_vigilancia\\_populacoes\\_expostas\\_agrotoxicos.pdf](http://bvsmis.saude.gov.br/bvsmis/publicacoes/relatorio_nacional_vigilancia_populacoes_expostas_agrotoxicos.pdf). [acesso em 10 jan. 2020].

Bundschuh, M. et al. Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? **Environmental Sciences Europe**, v. 30, n. 1, p. 6, 2018.

Bunglavan, S. J. et al. Use of nanoparticles as feed additives to improve digestion and absorption in livestock. **Livestock Research International**, v. 2, n. 3, p. 36–47, 2014.

Bunk, S. Better microscopes will be instrumental in nanotechnology development. **Nature**, v. 410, n. 6824, p. 127–129, 2001.

Burmeister, A. R. Horizontal Gene Transfer. **Evolution, Medicine and Public Health**, v. 2015, n. 1, p. 193–194, 2015.

Campos, E. V. R. et al. Polymeric and Solid Lipid Nanoparticles for Sustained Release of Carbendazim and Tebuconazole in Agricultural Applications. **Scientific Reports**, v. 5, 8 set. 2015.

De Oliveira, J. L. et al. Application of nanotechnology for the encapsulation of botanical insecticides for sustainable agriculture: Prospects and promises. **Biotechnology Advances**, v. 32, n. 8, p. 1550–1561, 2014.

Di Gregorio, M. C. et al. Mineral adsorbents for prevention of mycotoxins in

animal feeds. **Toxin Reviews**, v. 33, n. 3, p. 125–135, 2014.

Duffy, L. L. et al. Investigation into the antibacterial activity of silver, zinc oxide and copper oxide nanoparticles against poultry-relevant isolates of *Salmonella* and *Campylobacter*. **Food Control**, v. 92, p. 293–300, 2018.

Elkloub, K. M. et al. Effect of dietary nanosilver on broiler performance. **International Journal of Poultry Science**, v. 14, n. 3, p. 177–182, 2015.

FAO. Climate change and food security: Risks and responses. Rome, Italy: FAO, 2016.

Fernandes, C. P. et al. Development of an insecticidal nanoemulsion with *Manilkara subsericea* (Sapotaceae) extract. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 12, n. 1, p. 22, 2014.

Fondevila, M., Herrer, R., Casallas, M.C., Abecia, L., Ducha, J.J. Silver nanoparticles as a potential antimicrobial additive for weaned pigs. **Animal Feed Science and Technology**, v. 150, n. 3–4, p. 259–269, 2009.

Franci, G. et al. Silver Nanoparticles as Potential Antibacterial Agents. **Molecules**, v. 20, n. 5, p. 8856–8874, 2015.

Friedrich, T. A New Paradigm for Feeding the World in 2050 The Sustainable Intensification of Crop Production. **Resource Magazine**, v. 22, n. 2, p. 18–18, 2015.

Gao, J. et al. Preparation and properties of novel eco-friendly superabsorbent composites based on raw wheat bran and clays. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 739–747, 2016.

Gogos, A.; Knauer, K.; Bucheli, T. D. Nanomaterials in plant protection and fertilization: Current state, foreseen applications, and research priorities. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 39, p. 9781–9792, 2012.

Gopal, M.; Kumar, R.; Goswami, A. Nano-pesticides - a recent approach for pest control. **The Journal of Plant Protection Sciences**, v. 4, n. 2, p. 1–7, 2012.

Gopi, M. et al. Role of Nanoparticles in Animal and Poultry Nutrition: Modes of Action and Applications in Formulating Feed Additives and Food Processing. **International Journal of Pharmacology**, v. 13, n. 7, p. 724–731, 2017.

Grillo, R.; Abhilash, P. C.; Fraceto, L. F. Nanotechnology Applied to Bio-Encapsulation of Pesticides. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 16, n. 1, p. 1231–1234, 2016.

He, X.; Deng, H.; Hwang, H. The current application of nanotechnology in food and agriculture. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 27, n. 1, p. 1–21, 2019.

Helmiyati, H.; Syarifudin, A. Preparation and characterization of superabsorbent nanocomposites based on sodium alginate-g-acrylic acid-co-acrylamide/montmorillonite. Proceedings of the 3rd International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences. **Anais...AIP Conference Proceedings 2023:1**, 2018.

Hipps, K. W. e Scudiero, L. Electron Tunneling, a Quantum Probe for the Quantum World of Nanotechnology. **Journal of Chemical Education**, v. 82 (5), p. 704, 2005.

Hornyak, G.L., Tibbals, H.F., Dutta, J., Moore, J.J. Introduction to Nanoscience and Nanotechnology. **CRC Press**, Boca Raton, Florida, 2009.

Huang, B. et al. Advances in Targeted Pesticides with Environmentally Responsive Controlled Release by Nanotechnology. **Nanomaterials**, v. 8, n. 2, p. 102, 2018.

Kah, M.; Hofmann, T. Nanopesticide research: Current trends and future priorities. **Environment International**, v. 63, p. 224–235, 2014.

Khalifa, N. S.; Hasaneen, M. N. The effect of chitosan–PMAA–NPK nanofertilizer on *Pisum sativum* plants. **3 Biotech**, v. 8, n. 4, p. 193, 2018.

Khot, L. R. et al. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. **Crop Protection**, v. 35, p. 64–70, 2012.

Kitherian, S. Nano and Bio-nanoparticles for Insect Control. **Research Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2016.

Konop, M. et al. Certain Aspects of Silver and Silver Nanoparticles in Wound Care: A Minireview. **Journal of Nanomaterials**, v. 2016, p. 1–10, 2016.

Kubota, T. et al. Single electron tunneling organic devices. In: **Nanotechnology and Nano-Interface Controlled Electronic Devices**. [s.l.] Elsevier, 2003. p. 31–39.

Lade, B. D. et al. Nanobiopesticide formulations: Application strategies today and future perspectives. In: **Nano-Biopesticides Today and Future Perspectives**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 179–206.

Latour, R.A. et al. Adhesin-specific nanoparticles for removal of *Campylobacter jejuni* from poultry. CSREES Grant (2000-2003), Clemson University, Clemson, SC. [Internet] Disponível em: <https://portal.nifa.usda.gov/web/crisprojectpages/0186571-adhesin-specific-nanoparticles-for-removal-of-campylobacter-jejuni-from-poultry.html>. [acesso em jan 2020].

Lau, H. C.; Yu, M.; Nguyen, Q. P. Nanotechnology for oilfield applications: Challenges and impact. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 157, p. 1160–1169, 2017.

Li, Z.-Z. et al. Study of UV-shielding properties of novel porous hollow silica nanoparticle carriers for avermectin. **Pest Management Science**, v. 63, n. 3, p. 241–246, 2007.

Mahanty, T. et al. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 4, p. 3315–3335, 2017.

Medina-Pérez, G. et al. Nanotechnology in crop protection: Status and future trends. In: **Nano-Biopesticides Today and Future Perspectives**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 17–45.

Mishra, S. et al. Integrated approach of Agri-Nanotechnology: Challenges and future trends. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

Morais, J. P. S. et al. Extraction and characterization of nanocellulose structures from raw cotton linter. **Carbohydrate Polymers**, v. 91, n. 1, p. 229–235, 2013.

Nadziakiewicza, M.; Kehoe, S.; Micek, P. Physico-Chemical Properties of Clay Minerals and Their Use as a Health Promoting Feed Additive. **Animals**, v. 9, n. 10, p. 714, 2019.

Nair, R. et al. Nanoparticulate material delivery to plants. **Plant Science**, v. 179, n. 3, p. 154–163, 2010.

Nascimento, D. M. et al. Nanocellulose nanocomposite hydrogels: technological and environmental issues. **Green Chemistry**, v. 20, n. 11, p. 2428–2448, 2018.

Novoselov, K. S. et al. Electric field in atomically thin carbon films. **Science**, v. 306, n. 5696, p. 666–669, 2004.

Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y., Naidu, R. Nanoencapsulation, Nano-guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64 (7), p. 1447-1483, 2016.

Oerke, E.-C. Crop losses to pests. **The Journal of Agricultural Science**, v. 144, n. 1, p. 31–43, 2006.

Pajerski, W. et al. Attachment efficiency of gold nanoparticles by Gram-positive and Gram-negative bacterial strains governed by surface charges. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 21, n. 8, 2019.

Pandey, S. et al. Nanopesticides: Opportunities in Crop Protection and Associated Environmental Risks. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, v. 88, n. 4, p. 1287–1308, 2018.

Pavoni, L. et al. Green Micro- and Nanoemulsions for Managing Parasites, Vectors and Pests. **Nanomaterials**, v. 9, n. 9, p. 1285, 2019.

Perlatti, B. et al. Polymeric Nanoparticle-Based Insecticides: A Controlled Release Purpose for Agrochemicals. In: **Insecticides - Development of Safer and More Effective Technologies**. [s.l.] InTech, 2013.

Peters, R. et al. **Identification and characterization of organic nanoparticles in food**. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 30, n. 1, p. 100–112, 2011.

Prasad, R.; Bhattacharyya, A.; Nguyen, Q. D. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, n. JUN, 2017.

Rai, M. e Ingle, A. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 94, n. 2, p. 287–293, 2012.

RIKILT e JRC. Inventory of Nanotechnology applications in the agricultural, feed and food sector. **EFSA Supporting Publications:EN-621**, 125 pp, v. 11, n. 7, 2014.

Röder, J.; Dickmeis, C.; Commandeur, U. Small, Smaller, Nano: New Applications for Potato Virus X in Nanotechnology. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019.

Savary, S. et al. **The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology and Evolution***, v. 3, n. 3, p. 430–439, 2019.

Sekhon, B. S. Nanotechnology in agri-food production: an overview. ***Nanotechnology, Science and Applications***, v. 7, n. 2, p. 31-53, 2014.

Sengani, M.; Grumezescu, A. M.; Rajeswari, V. D. Recent trends and methodologies in gold nanoparticle synthesis – A prospective review on drug delivery aspect. ***OpenNano***, v. 2, p. 37–46, 2017.

Serviço Geológico do Brasil. 2014. <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Metais-Preciosos-1041.html>. [acesso em 06/01/2020].

Shi, L. et al. Effect of elemental nano-selenium on feed digestibility, rumen fermentation, and purine derivatives in sheep. ***Animal Feed Science and Technology***, v. 163, n. 2–4, p. 136–142, 2011.

Shi, Y. H. et al. Efficacy of modified montmorillonite nanocomposite to reduce the toxicity of aflatoxin in broiler chicks. ***Animal Feed Science and Technology***, v. 129, n. 1–2, p. 138–148, 2006.

Singh, S. et al. An attempt to develop surface plasmon resonance based immunosensor for Karnal bunt (*Tilletia indica*) diagnosis based on the experience of nano-gold based lateral flow immuno-dipstick test. ***Thin Solid Films***, v. 519, n. 3, p. 1156–1159, 2010.

Singla, P.; Mehta, R.; Upadhyay, S. N. Clay Modification by the Use of Organic Cations. ***Green and Sustainable Chemistry***, v. 02, n. 01, p. 21–25, 2012.

Steffens, C. et al. Bio-inspired sensor for insect pheromone analysis based on polyaniline functionalized AFM cantilever sensor. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, v. 191, p. 643–649, 2014.

Strohal, R. et al. Nanocrystalline silver dressings as an efficient anti-MRSA barrier: A new solution to an increasing problem. ***Journal of Hospital Infection***, v. 60, n. 3, p. 226–230, 2005.

Stutzenberger, F. J. et al. Adhesin-specific nanoparticles and process for using same. Depositante: Clemson University, Clemson, SC (US). Patent US 7682631 B2. Depósito: 01 out 2003. Concessão: 09 ago 2007. Disponível em: <http://www.freepatentsonline.com/7682631.html>. [acesso em 14 jan. 2020].

Suresh Kumar, R. S. et al. Distinctive effects of nano-sized permethrin in the environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 4, p. 2593–2602, 2013.

Swain, P. S. et al. Preparation and effects of nano mineral particle feeding in livestock: A review. **Veterinary World**, v. 8, n. 7, p. 888–891, 2015.

Tabashnik, B. E.; Brévault, T.; Carrière, Y. Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres. **Nature Biotechnology**, v. 31, n. 6, p. 510–521, 2013.

Tsokounoglou, M.; Ayerides, G.; Tritopoulou, E. The end of cheap oil: Current status and prospects. **Energy Policy**, v. 36, n. 10, p. 3797–3806, 2008.

Valério, J.R.; Koller, W.W. Proposição para o manejo integrado das cigarrinhas-das-pastagens. Campo Grande: Embrapa-CNPGC, 1992. 37p. (Embrapa-CNPGC. **Documentos**, 52).

Vurro, M.; Miguel-Rojas, C.; Pérez-De-Luque, A. Safe nanotechnologies for increasing the effectiveness of environmentally friendly natural agrochemicals. **Pest Management Science**, v. 75, n. 9, p. 2403–2412, 2019.

Wang, L. et al. Establishing Gene Delivery Systems Based on Small-Sized Chitosan Nanoparticles. **Journal of Ocean University of China**, v. 17, n. 5, p. 1253–1260, 2018.

Wang, L. et al. Oil-in-water nanoemulsions for pesticide formulations. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 314, n. 1, p. 230–235, 2007.

Wang, S. et al. Toxic effects of gold nanoparticles on *Salmonella typhimurium* bacteria. **Toxicology and Industrial Health**, v. 27, n. 6, p. 547–554, 2011.

Woodrow Wilson International Center for Scholars. 2012. [Internet] Project on emerging nanotechnologies. An inventory of nanotechnology-based consumer products currently on the market. Washington, DC: Disponível em: <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/> [acesso em dez 2019].

Yao, J., Yang, M., Duan, Y.X. Chemistry, biology, and medicine of fluorescent nanomaterials and related systems: new insights in to biosensing, bioimaging, genomics, diagnostics, and therapy. **Chem. Rev.**, v. 114, p. 6130-6178, 2014.



**Embrapa**

---

***Gado de Corte***



MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO



CGPE 15836