



CAPTAR
ciência e ambiente para todos

volume 11 • 2022 • art. 7

Nanoinseticidas como alternativa para o controlo de insetos na agricultura: vantagens e riscos associados

Apesar dos benefícios e da necessidade para o sector agroalimentar no controlo de diversas pragas e doenças, a utilização excessiva e generalizada de inseticidas convencionais pode ocasionar contaminação ambiental. Nos últimos anos, a aplicação da nanotecnologia tem beneficiado o setor agroalimentar no controlo mais sustentável de pragas, por proporcionar o desenvolvimento de nanopesticidas (NPest), em que nanomateriais (NM) permitem a encapsulação e libertação controlada de ingredientes ativos (IA) de inseticidas, direcionando o inseticida para as espécies-alvo e reduzindo assim a contaminação nos ecossistemas e na saúde humana. No entanto, devido à complexidade estrutural e física dos NM produzidos (diferentes materiais, morfologia, tamanho e solubilidade), a maioria dos estudos publicados demonstram a eficácia dos NPest contra as espécies-alvo, enquanto os ensaios ecotoxicológicos com estes NPest são muitas vezes escassos e/ou controversos. Neste contexto, a presente revisão destaca os principais materiais utilizados para a produção de nanoinseticidas, discute os seus benefícios e potenciais riscos associados para o meio ambiente, além de demonstrar estratégias promissoras para o aprimoramento da aplicação de nanoinseticidas no controlo de pragas na agricultura.

Palavras-chave

nanotecnologia
nanoencapsulamento
inseticida
eficácia
segurança ambiental

Catarina Ganilho¹

Ruth Pereira¹

Tatiana Andreani^{1,2*}

¹ GreenUPorto, Centro de Investigação em Produção Agroalimentar Sustentável, Departamento de Biologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal

² Centro de Investigação em Química (CIQ), Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal

*tatiana.andreani@fc.up.pt

ISSN 1647-323X

Artigo em acesso aberto sob [licença CC-BY](#)

© 2021 Autores

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado ao desenvolvimento tecnológico e industrial, despoletaram o aumento da procura de alimentos e consequentemente, a intensificação da atividade agrícola à escala mundial (Ghasemzadeh, 2012; Grillo et al., 2021) que triplicou nas últimas cinco décadas com recurso a agroquímicos (Sekhon, 2014; Rivera-Becerril et al., 2017).

Os dados globais em relação à aplicação de pesticidas revelam que em 2018, os inseticidas eram a terceira maior classe a nível mundial e em Portugal, no mesmo ano, cerca de 26% dos pesticidas utilizados eram inseticidas (FAOSTAT, 2020). Esta aplicação foi implementada para intensificar o rendimento e minimizar perdas pós-colheita e económicas (Fenner et al., 2013). Os inseticidas são agentes destinados à proteção das culturas agrícolas, utilizados para controlar pragas e vetores de doenças (Lackmann et al., 2021), mas, apesar dos benefícios e da necessidade para o sector agroalimentar, é provável que sejam removidos antes da sua aplicação devido a condições ambientais (vento, humidade, temperatura) que influenciam as perdas durante a aplicação por deriva aérea (pulverização foliar e/ou difusão) (Bedos et al., 2002; Margni et al., 2002; Piola et al., 2013). As restantes perdas são resultado de lixiviação, evaporação, deposição e degradação por fotólise, hidrólise e atividade microbiana (Mogul et al., 1996) e, por conseguinte, a concentração de ingredientes ativos (IA) na área alvo pode estar bem abaixo da concentração/dose efetiva. Consequentemente, para alcançar a resposta biológica desejada, em termos de controlo de pragas, a aplicação repetida de inseticidas (Nair et al., 2010) resulta na utilização de quantidades superiores às realmente necessárias e os sistemas agrícolas são incapazes de utilizar e neutralizar completamente os inseticidas aplicados (Moore e Locke, 2020). Além disso, a aplicação excessiva de inseticidas pode levar a contaminação do meio ambiente (solo e águas superficiais e subterrâneas) e afetar a saúde humana.

A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) sugere ações e diretrizes destinadas a orientar os países a atingir a sustentabilidade através dos “17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)” e destaca ainda como é importante a sua implementação em todo o mundo. Os objetivos 2 e 12 – “Erradicar a Fome” e “Produção e Consumo Sustentáveis” respetivamente, destacam a importância de mudanças nos campos agrícolas, garantir segurança alimentar, promover agricultura sustentável, aumentar produtividade agrícola, manter a proteção dos ecossistemas e ampliar os investimentos e novas tecnologias em países em desenvolvimento mantendo as *commodities* agrícolas (<https://globalcompact.pt/index.php/pt/agenda-2030>). Estes objetivos parecem de certa forma incompatíveis, a menos que se conjuguem novas práticas com os benefícios oferecidos pela nanotecnologia, por exemplo.

NANOPESTICIDAS: NOVAS FORMULAÇÕES DE INSETICIDAS

A nanotecnologia é a ciência da manipulação de átomos para formar produtos muito pequenos, denominados de nanomateriais (NM) e que são medidos na escala nanométrica (nm). Nos últimos anos, têm sido propostas estratégias para o controlo de pragas agrícolas de forma mais sustentável baseadas na nanotecnologia. Deste modo, o desenvolvimento da nanociência e nanotecnologia proporcionou inúmeras oportunidades para o setor agroalimentar (Sarlak et al., 2014; Datta et al., 2016; Kim et al., 2018), em que os NM (tamanho médio entre 1-1000 nm) (OCDE, 2020; ISO, 2017; Comissão Europeia, 2011; FDA, 2022)

são utilizados como nanocarregadores/nanotransportadores de inseticidas, ou seja, estes NM têm como função carregar os inseticidas diretamente para as pragas nocivas. A encapsulação de inseticidas em NM denomina-se de nanopesticidas (NPest), ou especificamente, de nanoinseticidas. Os NM podem proteger melhor o inseticida, já que este está no interior dos NM e assim, os inseticidas têm menos probabilidade de sofrer degradação prematura pela humidade, ar e pela luz solar, fatores que podem reduzir a sua eficácia (Nuruzzaman et al., 2016; Bratovcic et al., 2021). Qualquer aumento na eficácia dos inseticidas através da formulação à escala nanométrica pode contribuir para uma redução do seu nível de utilização global, porque a libertação dos inseticidas a partir dos NM é controlada e, assim menos dose de inseticida é aplicada, porque o efeito é mantido ao longo do tempo e não é preciso repetir a aplicação (Xu et al., 2022). Um estudo de Kah et al. (2018a) comparou a eficácia de diferentes inseticidas com a dos nanoinseticidas, observando um aumento de cerca de 20% a 30% na eficácia das formulações à escala nanométrica em comparação com os mesmos IA formulados convencionalmente. Devido à menor dimensão das partículas e maior superfície em comparação com as formulações convencionais, os nanoinseticidas demonstraram melhorar a ação e estabilidade dos IA (Chen et al., 2018; Wang et al., 2018).

Quais os tipos de materiais e sistemas que podem ser usados para a produção de nanoinseticidas?

Diversos materiais podem ser utilizados para a produção de NM, como polímeros, lípidos, sílica, zinco, ouro, prata, titânio e cobre (Shakiba et al., 2020; Kumar et al., 2019; Thabet et al., 2021; Sahoo et al., 2021; Tseng et al., 2020; Anand e Bhagat, 2019; Deka et al., 2021; Hajji-Hedfi e Chhipa, 2021). O foco atual é o desenvolvimento de diferentes formulações para o encapsulamento de IA de inseticidas (Kah et al., 2013). Como ilustrado na Figura 1, várias formas de nanosistemas para o encapsulamento de inseticidas podem ser obtidas resultando sob a forma de nanopartícula (NP) (Figura 1a), nanoemulsão (Figura 1b), nanocápsulas (Figura 1d) e nanoesfera (Figura 1c) (Fraceto et al., 2016; Singh et al., 2020) em que o tamanho reduzido facilita o contacto do inseticida com a praga ou a sua ingestão e, portanto, uma melhor ação do que formulações convencionais comercialmente existentes (Rajna et al., 2019).

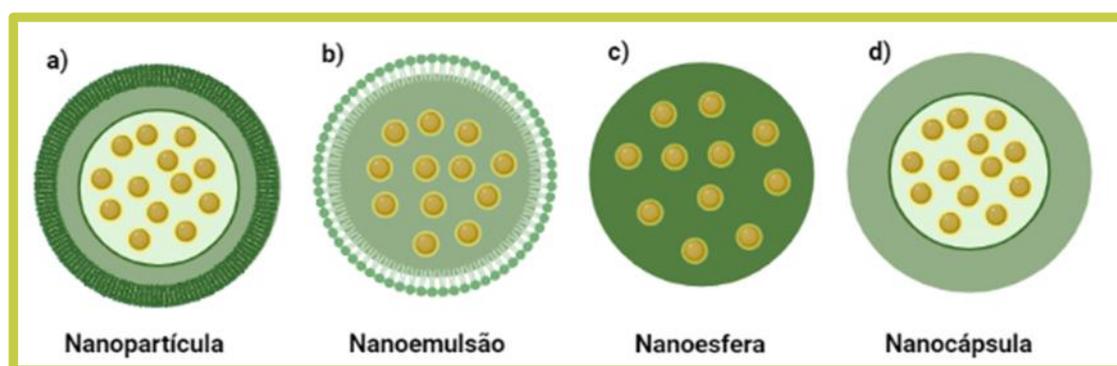


FIGURA 1: Desenho esquemático dos sistemas nanoestruturados para a produção de nanoinseticidas. As esferas amarelas ilustram o IA de inseticidas. Adaptado de Pohlmann et al. (2016). Criado através BioRender.com

Até agora, os nanosistemas para encapsulação de inseticidas que têm demonstrado grande potencial para atingir os objetivos descritos acima, são os à base de lípidos, polímeros, de sílica e argila (Bordes et al., 2009; Kumar et al., 2019), como mostrado na Tabela I.

O nanoencapsulamento consiste em encapsular um ou mais inseticidas em nanocarregadores e permite que o inseticida seja fácil de aplicar à planta, distribuir uniformemente e permanecer estável após a utilização. A falta de solubilidade em água é um dos fatores limitantes no desenvolvimento de agentes protetores das culturas e por isso, a nanoencapsulação tem sido utilizada como uma ferramenta versátil para inseticidas pouco solúveis em água, aumentando a dispersão em meio aquoso, permeabilidade e estabilidade e permitindo uma libertação controlada do inseticida (Sasson et al., 2007; Nair et al., 2010).

TABELA I: Tipos de nanosistemas e inseticidas encapsulados para a produção de nanoinseticidas.

Tipos de nanosistemas	Inseticidas encapsulados	Referência
Nanocápsulas de lípido	Deltametrina	Pitti Caballero et al., 2019
Nanopartículas de glucose	Lambda-cialotrina	Wang et al., 2021
Nanoemulsões^a	Óleo de neem	Jerobin et al., 2012
Nanocápsulas de polímero^b	Imidacloprida	Memarizadeh et al., 2014
Nanopartículas de lípido/polímero^c	Imidacloprida e Lambda-cialotrina	Graily-Moradi et al., 2021
Nanopartículas de sílica	Avermectina	Li et al., 2007
Nanocompósitos de argila	Cipermetrina	Xiang et al., 2017

^aencapsulamento utilizando polímeros alginato de sódio (Na-Alg), amido e polietilenoglicol (PEG);

^bcopolímeros compostos por poli (ácido cítrico) e polietilenoglicol (PEG); ^cfosfatidilcolina e quitosano.

Porquê aplicar nanoinseticidas na gestão de pragas de insetos?

Os NPest são considerados seguros e eficientes para o controlo de pragas e atraem a atenção da comunidade científica e do setor agroindustrial devido à sua capacidade de aumentar a eficiência contra os organismos-alvo e reduzir os efeitos secundários indesejáveis ultrapassando algumas limitações apresentadas pelos pesticidas convencionais, incluindo a redução das quantidades aplicadas de pesticidas nas culturas, promovendo o controlo e segurança na libertação de pesticidas com o mínimo impacto ambiental e humano possível (Ghormade et al., 2011; Rajna et al., 2019). Vários estudos científicos comprovaram a eficácia de NPest no controlo de pragas, como relatado por Memarizadeh et al. (2014) através de um bioensaio com o inseto *Glyphodes pyloalis* (vulgo nome traça), em que mostraram que ao utilizar o nanoinseticida à base de imidacloprida (IMI), a dosagem e o risco ambiental diminuíam significativamente (Memarizadeh et al., 2014). Pitti-Caballero et al. (2019) desenvolveram uma estratégia para aumentar a eficácia de inseticidas utilizando baixas doses (Pitti Caballero et al., 2019). Esta estratégia foi baseada na encapsulação do inseticida deltametrina em nanocápsulas de lípido combinado com o inseticida indoxacarbe. A encapsulação do deltametrina resultou num aumento da eficácia do indoxacarbe em baratas *Periplaneta americana*.

Graily-Moradi et al. (2021) demonstraram que NM contendo dois inseticidas, o IMI e o lambda-cialotrina (LC), são capaz de controlar eficazmente a espécie *Myzus persicae* (vulgo nome pulgão-verde) e é uma estratégia promissora para atrasar a resistência do inseto aos inseticidas. Recentemente, Tortorici et al. (2022) observaram que NP de lípido contendo diferentes óleos (lavanda, alecrim e hortelã-pimenta) foram eficientes contra as espécies *Aphis gossypii*, *Spodoptera littoralis* e *Tuta absoluta* (Tortorici et al., 2022).

A aplicação de nanoinseticidas pode causar danos ao ambiente?

Embora haja vários dados científicos que indiquem todos os benefícios enumerados nesta revisão, à semelhança dos pesticidas convencionais, os NPest podem provocar efeitos ecotoxicológicos devido à forma como interagem com as espécies não-alvo e com o ambiente (Grillo et al., 2021). Em particular, a libertação extensiva de NM no ambiente e na cadeia alimentar pode constituir um risco para a saúde humana (Zulfiqar et al., 2019). Alguns estudos ecotoxicológicos têm sido realizados em diferentes ambientes e organismos para determinar o destino, comportamento e toxicidade dos NPest (Kobetičová e Černý, 2017; Walker et al., 2018). Por exemplo, alguns estudos ao testarem inseticidas piretróides concluíram que os NPest levaram a um aumento do efeito do inseticida em espécies-alvo (Mishra et al., 2019; Taktak et al., 2021; Ahmadi et al., 2021; Papanikolaou et al., 2018; Oliveira et al., 2019). No entanto, o atual estado de conhecimento não parece ser suficiente para se fazer uma avaliação fiável dos seus benefícios e riscos associados. Os ensaios ecotoxicológicos normalizados para produtos químicos convencionais, como os pesticidas, também não são necessariamente adequados para os ensaios com NPest, porque podem diferir em termos de cinética de libertação ou dissolução do IA, bem como interações com as plantas e o solo, em comparação com as formulações convencionais (Fojtová et al., 2019; Kah e Hofmann, 2014). Os NPest são uma nova classe de produtos fitofarmacêuticos que prometem potenciais benefícios para a agricultura. No entanto, tanto os benefícios como os riscos potenciais para o ambiente ainda são mal compreendidos e devem ser equilibrados com as preocupações com o solo, água, ambiente e a saúde ocupacional dos trabalhadores (Mesci-Haftaci et al., 2014; Pradhan e Mailapalli, 2020). Há escassas informações sobre o efeito de NPest em espécies não-alvo aquáticas e terrestres, bem como na saúde humana, e na maioria das vezes os dados reportados na literatura são contraditórios além dos mecanismos de toxicidade dos NPest ainda serem desconhecidos. Contudo, a investigação nesta área é muito ativa e dará respostas no futuro sobre a sua aplicabilidade. Alguns estudos avaliaram a biosegurança de nanoemulsões de quatro inseticidas (alfa-cipermetrina, deltametrina, LC, e permetrina) contra microalgas de água doce *Raphidocelis subcapitata* (Taktak et al., 2021), espécies de algas do género *Closterium*, o peixe *Danio rerio* e a espécie de planta *Cicer arietinum* (Mishra et al., 2019) estabelecendo um comportamento não tóxico quando comparadas às formulações convencionais destes mesmos inseticidas.



NANOTECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE: COMO PODEMOS MELHORAR A APLICAÇÃO DE NANOINSETICIDAS SEM PREJUDICAR O AMBIENTE?

Desenvolvimento de nanoinseticidas à base de lípidos fisiológicos e biodegradáveis

A produção de NM mais seguros tanto para o ambiente quanto para a saúde humana é de extrema relevância. Deste modo, a utilização de materiais e técnicas amigas do ambiente podem constituir uma excelente alternativa para diminuir os riscos associados ao uso de nanoinseticidas. Neste contexto, a produção de NM à base de lípidos fisiológicos e biodegradáveis para o encapsulamento de inseticidas pode ser uma estratégia inovadora para garantir a aplicação segura e eficaz de inseticidas. As nanopartículas lipídicas (NL) são sistemas de transporte promissores para carregar IA de inseticidas devido à sua flexibilidade para encapsular substâncias hidrofílicas e lipofílicas (Dorraj e Moghimi, 2015; Üner e Yener, 2007). Estes sistemas são compostos por lípidos sólidos à temperatura ambiente (NLS, Nanopartículas

Lipídicas Sólidas) ou uma mistura de lípidos sólidos e líquidos (CLN, Carregadores Lipídicos Nanoestruturados) e podem ser produzidos sem o uso de solventes orgânicos (Pallerla e Prabhakar, 2013) utilizando na sua maioria lípidos biodegradáveis (Nguyen et al., 2012), biocompatíveis (Sharma e Baldi, 2018) e comestíveis (McClements, 2013). Como exemplificado na Tabela I, NL tem sido utilizadas para o encapsulamento de inseticidas, como o LC, gama-cialotrina, deltametrina e IMI, demonstrando excelente resultados contra as espécies-alvo, nomeadamente em pulgões do nabo (Wang et al., 2021), na barata *Periplaneta americana* (Pitti-Caballero et al., 2019), em ninfas *Dysdercus cingulatus* e larvas *Spodoptera littoralis*, em *Glyphodes pyloalis* (Memarizadeh et al., 2014) e em *Myzus persicae* (Graily-Moradi et al., 2021).

Desenvolvimento de nanobioinseticidas: Inseticidas naturais como forma de controlo de pragas

Biopesticidas são pesticidas derivados de materiais naturais como microrganismos (fungos, bactérias e vírus) e plantas (óleos essenciais e feromonas). Os biopesticidas são considerados mais sustentáveis em comparação com os pesticidas convencionais, e por isso, a sua aplicação tem sido considerada uma estratégia promissora e amiga do ambiente. No entanto, apesar de suas vantagens como pesticidas sustentáveis, estes pesticidas são muito sensíveis, sendo facilmente afetados por fatores ambientais, como temperatura, humidade e luz, tornando sua vida-útil limitada e reduzindo a sua persistência nos campos agrícolas. Deste modo, o uso de NM como transportadores é uma estratégia promissora para resolver os problemas de estabilidade e favorecer a eficácia dos biopesticidas contra as pragas e doenças na agricultura. Vários estudos têm sido conduzidos nesta temática, em que nanoinseticidas são desenvolvidos a partir de compostos naturais ao invés de compostos sintéticos. Campos et al. (2018) encapsularam carvacrol e linalol em NP poliméricas obtendo elevada eficácia contra *Helicoverpa armigera* (lagarta da espiga do milho) e *Tetranychus urticae* (Koch) (ácaro rajado – aranha amarelo) (Campos et al., 2018). Oliveira et al. (2018, 2019) usaram zeína para encapsular combinações de geraniol e R-citronelal, bem como geraniol, eugenol e cinamaldeído. No primeiro estudo, a encapsulação aumentou a atividade biológica dos compostos contra *T. urticae* (Oliveira et al., 2018). No segundo estudo, foram observados efeitos aprimorados contra a mesma praga e *Chrysodeixis includens* (Walker) (larva soja looper) (Oliveira et al., 2019). Em ambos os casos, houve diminuição dos efeitos tóxicos para organismos não-alvo. Outro estudo conduzido por Kamaraj et al. (2018) demonstrou grande potencial das NP de goma de neem contra larvas e pupas de *H. armigera* e *Spodoptera litura* (Fabricius) (lagarta-desfolhadora), enquanto esta nanoformulação não afetou o organismo não-alvo *Eudrilus eugeniae* (Kinberg) (oligoqueta/minhoca) (Kamaraj et al., 2018). Recentemente, Pascoli et al. (2020) desenvolveram nanobiopesticidas à base de NP de zeína contendo o óleo de neem e observaram que estes biopesticidas induziram grande mortalidade em *Bemisia tabaci* (mosca-branca) e *T. urticae* (Pascoli et al., 2020).

Preparação de nanomateriais por meio da utilização de subprodutos: Uma perspectiva sobre a economia circular

Outra alternativa para a melhoria da aplicação de nanoinseticidas, é a utilização de subprodutos ou resíduos que não são tóxicos para o meio ambiente. A transformação de resíduos em recursos é um dos principais vetores do princípio da economia circular, de forma a agregar valor a estes produtos.

Deste modo, o emprego de subprodutos para o desenvolvimento de NM está cada vez mais presente na comunidade científica com o intuito de se produzir NPest utilizando produtos que seriam descartados pelo setor industrial. Neste contexto, os NPest de base lignocelulósica são biodegradáveis e oferecem uma plataforma interessante para a produção de NPest seguros, uma vez que podem não apresentar toxicidade (Chamundeeswari et al., 2019; Bhattacharyya et al., 2020; Shrestha et al., 2021; Ur Rahim et al., 2021). Além disso, o material lignocelulósico é um produto primário e secundários da extração florestal (madeira, bambu, resíduos da colheita florestal e do processamento mecânico da madeira), da agricultura (partes de cereais, cânhamo, entre outros) e até mesmo de resíduos sólidos urbanos (RSU) (embalagens, madeira de demolição, entre outros), o que é ideal para reduzir os custos durante a produção. Embora a manipulação da sua matéria-prima seja um desafio, os materiais lignocelulósicos têm uma produção de baixo custo e propriedades ecológicas (Li et al., 2021a). Esta estratégia também indica um esforço para a implementação da economia circular (Lima et al., 2021). Nos últimos anos, NP à base de lignina têm sido utilizadas na agricultura contra insetos devido às suas propriedades ecológicas, baixo custo, e boas propriedades de encapsulamento. Outros materiais lignocelulósicos, como a pectina, mesmo em quantidades menores, estão a aumentar a sua aplicação nas práticas agrícolas, como NM para o encapsulamento seguro de pesticidas (Abdelrahman et al., 2021). Além dos exemplos citados acima, a casca de arroz também tem sido aproveitada para a produção de NM, especialmente de sílica (Bhat et al., 2021). A casca de arroz é uma das camadas que envolvem as sementes de arroz e torna-se raramente utilizada, gerando assim resíduos. O principal conteúdo de casca de arroz é sílica. A sílica tem um papel no aumento da produtividade e no fortalecimento do crescimento das plantas; por conseguinte, é resistente a ataques de pragas agrícolas (Indriani et al., 2019). Vários estudos têm relatado a produção ecológica de NP de sílica obtidas da casca de arroz para o reaproveitamento deste resíduo (Agi et al., 2020; Sankar et al., 2018) e deste modo, esta estratégia também pode contribuir não só para a utilização de subprodutos, como também para a redução de materiais sintéticos para a produção de NM, minimizando a contaminação ambiental.

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS

A nanotecnologia traz para a agricultura o desenvolvimento de nanoinseticidas que tem por objetivo servir como agente de tratamento de pragas e, conseqüentemente, aumentar a produção. Em particular, muita da investigação tem-se concentrado recentemente no desenvolvimento de formulações à escala nanométrica de inseticidas. Este artigo analisou o estado atual do conhecimento sobre os nanoinseticidas sabendo que existe uma grande preocupação em relação aos NM que podem exercer efeitos perigosos sobre o solo, a saúde humana e o ambiente, mas com o potencial de serem seguros, de preparação fácil, de baixo custo e eficaz para diminuir a infestação de pragas nos campos agrícolas. A natureza muito pequena dos nanoinseticidas também levantou, contudo, questões sobre a sua segurança e sustentabilidade ambiental, o que requer a consideração tanto dos prováveis benefícios como dos potenciais riscos dos nanoinseticidas. A tecnologia tem sido utilizada para desenvolver formulações que são controladas por libertação, e são concebidas para serem mais eficazes e orientadas contra as espécies de pragas do que as formulações convencionais. Assim, os nanoinseticidas representam um desenvolvimento científico esperançoso que oferece uma variedade de benefícios, incluindo uma maior eficácia, durabilidade, e uma redução das

quantidades inseticidas que estão a ser utilizados na proteção das culturas. A confirmarem-se estes benefícios os nanoinseticidas contribuirão para alcançar o objetivo de redução de 50% no risco e no uso de pesticidas até 2050, assumido pela Estratégia do Prado ao Prato publicada pela Comissão Europeia (CE, 2020).

agradecimentos • Este trabalho foi apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) (P2020/COMPETE), através do projeto de investigação SaFe NPest — Synthesis and Environmental Safety of Nanopesticides (POCI-01-0145-FEDER-029343). Este trabalho foi também parcialmente apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, através dos Projetos Estratégicos do GreenUPorto (UIDB/05748/2020 e UIDP/05748/2020), CIQUP (UIDB/00081/2020) e LA/P/0056/2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, T. M., Qin, X., Li, D., Senosy, I. A., Mmby, M., Wan, H., ... He, S. (2021). Pectinase-responsive carriers based on mesoporous silica nanoparticles for improving the translocation and fungicidal activity of prochloraz in rice plants. *Chemical Engineering Journal*, 404(April 2020), 126440. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126440>
- Agi, A., Junin, R., Jaafar, M. Z., Mohsin, R., Arsad, A., Gbadamosi, A., ... Gbonhinbor, J. (2020). Synthesis and application of rice husk silica nanoparticles for chemical enhanced oil recovery. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13054–13066. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.112>
- Ahmadi, V. D., Rafiei-Karahroudi, Z., Sanatgar, E., Alizadeh, B. H., & Goldasteh, S. (2021). Chlorpyrifos-loaded silver/polyethylene glycol/chitosan nanocomposite: Improved termiticidal activity against *microcerotermes diversus*. (isoptera: Termitidae). *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 32(1), 43–51. <https://doi.org/10.22059/JSCIENCES.2020.297633.1007500>
- Anand, R., & Bhagat, M. (2019). Silver nanoparticles (AgNPs): as nanopesticides and nanofertilizers. *MOJ Biology and Medicine*, 4(1), 19–20. <https://doi.org/10.15406/mojbm.2019.04.00107>
- Bedos, C., Cellier, P., Calvet, R., & Barriuso, E. (2002). Occurrence of pesticides in the atmosphere in France Carole. *Agronomie*, 23(May 2014), 407–418. <https://doi.org/10.1051/agro>
- Bhat, J. A., Rajora, N., Raturi, G., Sharma, S., Dhiman, P., Sanand, S., ... Deshmukh, R. (2021). Silicon nanoparticles (SiNPs) in sustainable agriculture: Major emphasis on the practicality, efficacy and concerns. *Nanoscale Advances*, 3(14), 4019–4028. <https://doi.org/10.1039/d1na00233c>
- Bhattacharyya, C., Roy, R., Tribedi, P., Ghosh, A., & Ghosh, A. (2020). Biofertilizers as substitute to commercial agrochemicals. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation*. LTD. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-103017-2.00011-8>
- Bordes, P., Pollet, E., & Avérous, L. (2009). Nano-biocomposites: Biodegradable polyester/nanoclay systems. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 34(2), 125–155. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.10.002>
- Bratovcic, A., Hikal, W. M., Said-Al Ahl, H. A. H., Tkachenko, K. G., Baeshen, R. S., Sabra, A. S., & Sany, H. (2021). Nanopesticides and Nanofertilizers and Agricultural Development: Scopes, Advances and Applications. *Open Journal of Ecology*, 11(04), 301–316. <https://doi.org/10.4236/oje.2021.114022>
- Campos, E. V. R., Proença, P. L. F., Oliveira, J. L., Pereira, A. E. S., De Moraes Ribeiro, L. N., Fernandes, F. O., ... Fraceto, L. F. (2018). Carvacrol and linalool co-loaded in β -cyclodextrin-grafted chitosan nanoparticles as sustainable biopesticide aiming pest control. *Scientific Reports*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26043-x>
- Chamundeewari, M., Jeslin, J., & Verma, M. L. (2019). Nanocarriers for drug delivery applications. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 849–865. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00841-1>
- Chen, K., Fu, Z., Wang, M., Lv, Y., Wang, C., Shen, Y., ... Guo, X. (2018). Preparation and Characterization of Size-Controlled Nanoparticles for High-Loading λ -Cyhalothrin Delivery through Flash Nanoprecipitation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(31), 8246–8252. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02851>
- Comissão Europeia. (2020). Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao conselho, ao Comité económico e social europeu e ao Comité das regiões - Estratégia do Prado ao Prato para um sistema alimentar justo, saudável e respeitador do ambiente PT. Official Journal of the European Union. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/from-farm-to-fork/>.
- Datta, S., Singh, J., Singh, S., & Singh, J. (2016). Earthworms, pesticides and sustainable agriculture: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(9), 8227–8243. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6375-0>

- De Oliveira, Jhones L, Campos, E. V. R., Germano-Costa, T., Lima, R., Vechia, J. F. Della, Soares, S. T., ... Fraceto, L. F. (2019). Association of zein nanoparticles with botanical compounds for effective pest control systems. *Pest Management Science*, 75(7), 1855–1865. <https://doi.org/10.1002/ps.5338>
- De Oliveira, Jhones Luiz, Campos, E. V. R., Pereira, A. E. S., Nunes, L. E. S., Da Silva, C. C. L., Pasquoto, T., ... Fraceto, L. F. (2018). Geraniol Encapsulated in Chitosan/Gum Arabic Nanoparticles: A Promising System for Pest Management in Sustainable Agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), 5325–5334. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00331>
- Deka, B., Babu, A., Baruah, C., & Barthakur, M. (2021). Nanopesticides: A Systematic Review of Their Prospects With Special Reference to Tea Pest Management. *Frontiers in Nutrition*, 8(August). <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.686131>
- Dorraj, G., & Moghimi, H. R. (2015). Preparation of SLN-containing thermoresponsive in-situ forming gel as a controlled nanoparticle delivery system and investigating its rheological, thermal and erosion behavior. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 14(2), 347–358. <https://doi.org/10.22037/ijpr.2015.1640>
- European Commission. (2011). Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial. *Official Journal of the European Union*, 38–40. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011H0696>
- FDA (2022). Drug Products, Including Biological Products, that Contain Nanomaterials - Guidance for Industry 313 (FDA-2017-D-0759). Food and Drug Administration Guidance: <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/drug-products-including-biological-products-contain-nanomaterials-guidance-industry>
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L. P., & Elsner, M. (2013). Evaluating pesticide degradation in the environment: Blind spots and emerging opportunities. *Science*, 341(6147), 752–758. <https://doi.org/10.1126/science.1236281>
- Fojtová, D., Vašíčková, J., Grillo, R., Bílková, Z., Šimek, Z., Neuwirthová, N., ... Hofman, J. (2019). Nanoformulations can significantly affect pesticide degradation and uptake by earthworms and plants. *Environmental Chemistry*, 16(6), 470–481. <https://doi.org/10.1071/EN19057>
- Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4(MAR), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
- Ghasemzadeh, A. (2012). Global Issues of Food Production. *Agrotechnology*, 01(02), 1–2. <https://doi.org/10.4172/2168-9881.1000e102>
- Ghormade, V., Deshpande, M. V., & Paknikar, K. M. (2011). Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances*, 29(6), 792–803. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.007>
- Graily-Moradi, F., Hejazi, M. J., Enayati, A. A., & Hamishehkar, H. (2021). Evaluation of co-nanoencapsulation process on the toxicity and biochemical metabolism of imidacloprid and lambda-cyhalothrin in *Myzus persicae* (Sulzer). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 33(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101974>
- Grillo, R., Fraceto, L. F., Amorim, M. J. B., Scott-Fordsmand, J. J., Schoonjans, R., & Chaudhry, Q. (2021). Ecotoxicological and regulatory aspects of environmental sustainability of nanopesticides. *Journal of Hazardous Materials*, 404(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124148>
- Hajji-Hedfi, L., & Chhipa, H. (2021). Nano-based pesticides: challenges for pest and disease management. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(3), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s41207-021-00279-y>
- Indriani, D. W., Barunawati, N., Sumarlan, S. H., & Teresia, L. (2019). Silica Extraction From Rice Husk As a Slow Release Fertilizer Using Microwave Assisted Extraction. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 96(12), 195–200. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2019-12.24>
- ISO (2017). Nanotechnologies - Use and application of acellular in vitro tests and methodologies to assess nanomaterial biodegradability. International Organisation for Standardization Guideline (TR 19057). Geneva.
- Jerobin, J., Sureshkumar, R. S., Anjali, C. H., Mukherjee, A., & Chandrasekaran, N. (2012). Biodegradable polymer based encapsulation of neem oil nanoemulsion for controlled release of Aza-A. *Carbohydrate Polymers*, 90(4), 1750–1756. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.07.064>
- Kah, M, Beulke, S., Tiede, K., & Hofmann, T. (2013). Nanopesticides: State of Knowledge, Environmental Fate, and Exposure Modeling. (July 2015). <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.671750>
- Kah, Melanie, & Hofmann, T. (2014). Nanopesticide research: Current trends and future priorities. *Environment International*, 63, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.015>
- Kamaraj, C., Gandhi, P. R., Elango, G., Karthi, S., Chung, I. M., & Rajakumar, G. (2018). Novel and environmental friendly approach; Impact of Neem (*Azadirachta indica*) gum nano formulation (NGNF) on *Helicoverpa armigera* (Hub.) and *Spodoptera litura* (Fab.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(PartA), 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.145>
- Kim, D. Y., Kadam, A., Shinde, S., Saratale, R. G., Patra, J., & Ghodake, G. (2018). Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: a transition replete with opportunities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3), 849–864. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8749>

- Kobetičová, K., & Černý, R. (2017). Ecotoxicology of building materials: A critical review of recent studies. *Journal of Cleaner Production*, 165, 500–508. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.161>
- Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., Hassan, A. A., & Kim, K. H. (2019). Nano-based smart pesticide formulations: Emerging opportunities for agriculture. *Journal of Controlled Release*, 294(December 2018), 131–153. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.12.012>
- Lackmann, C., Velki, M., Bjedov, D., Ečimović, S., Seiler, T. B., & Hollert, H. (2021). Commercial preparations of pesticides exert higher toxicity and cause changes at subcellular level in earthworm *Eisenia andrei*. *Environmental Sciences Europe*, 33(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00455-5>
- Li, P., Huang, Y., Fu, C., Jiang, S. X., Peng, W., Jia, Y., ... Xu, Z. P. (2021). Eco-friendly biomolecule-nanomaterial hybrids as next-generation agrochemicals for topical delivery. *EcoMat*, (July), 1–19. <https://doi.org/10.1002/eom2.12132>
- Li, Z.-Z., Chen, J.-F., Liu, F., Liu, A.-Q., Wang, Q., Sun, H.-Y., & Wen, L.-X. (2007). Study of UV-shielding properties of novel porous hollow silica nanoparticle carriers for avermectin. *Pest Management Science*, 63(11), 1100–1106. <https://doi.org/10.1002/ps>
- Lima, P. H. C. de, Antunes, D. R., Forini, M. M. de L., Pontes, M. da S., Mattos, B. D., & Grillo, R. (2021). Recent Advances on Lignocellulosic-Based Nanopesticides for Agricultural Applications. *Frontiers in Nanotechnology*, 3(December). <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.809329>
- Margni, M., Rossier, D., Crettaz, P., & Jolliet, O. (2002). Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93(1–3), 379–392. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00336-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00336-X)
- McClements, D. J. (2013). Edible lipid nanoparticles: Digestion, absorption, and potential toxicity. *Progress in Lipid Research*, 52(4), 409–423. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2013.04.008>
- Memarizadeh, N., Ghadamyari, M., Adeli, M., & Talebi, K. (2014). Preparation, characterization and efficiency of nanoencapsulated imidacloprid under laboratory conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 107, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.009>
- Mesci-Haftaci, S., Ankarali, H., Caglar, M., & Yavuzcan, A. (2014). Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 15(17), 7317–7320. <https://doi.org/10.7314/APJCP.2014.15.17.7317>
- Mishra, P., Dutta, S., Haldar, M., Dey, P., Kumar, D., Mukherjee, A., & Chandrasekaran, N. (2019). Enhanced mosquitocidal efficacy of colloidal dispersion of pyrethroid nanometric emulsion with benignity towards non-target species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 176(March), 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.096>
- Mogul, M. G., Akin, H., Hasirci, N., Trantolo, D. J., Gresser, J. D., & Wise, D. L. (1996). Controlled release of biologically active agents for purposes of agricultural crop management. *Resources, Conservation and Recycling*, 16(1–4), 289–320. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00063-1)
- Moore, M. T., & Locke, M. A. (2020). Experimental Evidence for Using Vegetated Ditches for Mitigation of Complex Contaminant Mixtures in Agricultural Runoff. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(4). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04489-y>
- Mutyam Pallerla, S., & Prabhakar, B. (2013). A review on solid lipid nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 20(2), 196–206. <https://doi.org/10.5958/0975-4377.2016.00030.6>
- Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y., & Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179(3), 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012>
- Nguyen, H. M., Hwang, I. C., Park, J. W., & Park, H. J. (2012). Enhanced payload and photo-protection for pesticides using nanostructured lipid carriers with corn oil as liquid lipid. *Journal of Microencapsulation*, 29(6), 596–604. <https://doi.org/10.3109/02652048.2012.668960>
- Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, Nano-guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(7), 1447–1483. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214>
- OCDE (2020), Test No. 318: Guidance Document for the testing of dissolution and dispersion stability of nanomaterials and the use of the data for further environmental testing and assessment strategies. Series on Testing and Assessment No. 318. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, 318, 1–48. www.oecd.org/chemicalsafety
- Organização das Nações Unidas (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Portugal (ODS Portugal). Disponível em <https://unric.org/pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em 10 setembro 2021.
- Papanikolaou, N. E., Kalaitzaki, A., Karamaouna, F., Michaelakis, A., Papadimitriou, V., Dourtoglou, V., & Papachristos, D. P. (2018). Nano-formulation enhances insecticidal activity of natural pyrethrins against *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) and retains their harmless effect to non-target predators. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 10243–10249. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8596-2>
- Pascoli, M., de Albuquerque, F. P., Calzavara, A. K., Tinoco-Nunes, B., Oliveira, W. H. C., Gonçalves, K. C., ... Fraceto, L. F. (2020). The potential of nanobiopesticide based on zein nanoparticles and neem oil for enhanced control of agricultural pests. *Journal of Pest Science*, 93(2), 793–806. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01194-x>

- Piola, L., Fuchs, J., Oneto, M. L., Basack, S., Kesten, E., & Casabé, N. (2013). Comparative toxicity of two glyphosate-based formulations to *Eisenia andrei* under laboratory conditions. *Chemosphere*, 91(4), 545–551. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.12.036>
- Pitti Caballero, J., Murillo, L., List, O., Bastiat, G., Flochlay-Sigognault, A., Guerino, F., ... Ataire-Marchais, V. (2019). Nanoencapsulated deltamethrin as synergistic agent potentiates insecticide effect of indoxacarb through an unusual neuronal calcium-dependent mechanism. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 157(March), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.03.014>
- Pohlmann, M., Rossi, W. S., Brendler, C. F., Teixeira, F. G., & Kindlein Júnior, W. (2016). Fabricação Digital Para Auxiliar No Ensino-Aprendizado De Alunos Com Deficiência Visual: Estudo De Caso Dos Sistemas Nanoestruturados. (October), 2389–2396. <https://doi.org/10.5151/despro-ped2016-0204>
- Pradhan, S., & Mailapalli, D. R. (2020). Nanopesticides for Pest Control. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33281-5_2
- Rajna, Paschapur, & Raghavendra. (2019). Nanopesticides: Its Scope and Utility in Pest Management. *Indian Farmer*, 6(1), 17–21.
- Rivera-Becerril, F., van Tuinen, D., Chatagnier, O., Rouard, N., Béguet, J., Kuszala, C., ... Martin-Laurent, F. (2017). Impact of a pesticide cocktail (fenhexamid, folpel, deltamethrin) on the abundance of Glomeromycota in two agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 577, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.098>
- Sahoo, D., Sahoo, B., & Sahoo, S. (2021). Zinc oxide nanostructures as effective pesticide controllers: Sensing and degradation of pesticides. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822836-4.00013-6>
- Sankar, S., Kaur, N., Lee, S., & Kim, D. Y. (2018). Rapid sonochemical synthesis of spherical silica nanoparticles derived from brown rice husk. *Ceramics International*, 44(7), 8720–8724. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.090>
- Sarlak, N., Taherifar, A., & Salehi, F. (2014). Synthesis of nanopesticides by encapsulating pesticide nanoparticles using functionalized carbon nanotubes and application of new nanocomposite for plant disease treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(21), 4833–4838. <https://doi.org/10.1021/jf404720d>
- Sekhon, B. S. (2014). Nanotechnology in agri-food production: An overview. *Nanotechnology, Science and Applications*, 7(2), 31–53. <https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>
- Shakiba, S., Astete, C. E., Paudel, S., Sabliov, C. M., Rodrigues, D. F., & Louie, S. M. (2020). Emerging investigator series: Polymeric nanocarriers for agricultural applications: Synthesis, characterization, and environmental and biological interactions. *Environmental Science: Nano*, 7(1), 37–67. <https://doi.org/10.1039/c9en01127g>
- Sharma, A., & Baldi, A. (2018). Nanostructured Lipid Carriers: A Review Journal of Developing Drugs. *Journal of Developing Drugs*, 7(2), 1–12. <https://doi.org/10.4172/2329-6631.10001>
- Shrestha, S., Kognou, A. L. M., Zhang, J., & Qin, W. (2021). Different Facets of Lignocellulosic Biomass Including Pectin and Its Perspectives. *Waste and Biomass Valorization*, 12(9), 4805–4823. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01305-w>
- Singh, A., Dhiman, N., Kar, A. K., Singh, D., Purohit, M. P., Ghosh, D., & Patnaik, S. (2020). Advances in controlled release pesticide formulations: Prospects to safer integrated pest management and sustainable agriculture. *Journal of Hazardous Materials*, 385(October 2019), 121525. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121525>
- Taktak, N. E. M., Badawy, M. E. I., Awad, O. M., Abou El-Ela, N. E., & Abdallah, S. M. (2021). Enhanced mosquitocidal efficacy of pyrethroid insecticides by nanometric emulsion preparation towards *Culex pipiens* larvae with biochemical and molecular docking studies. *Journal of the Egyptian Public Health Association*, 96(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s42506-021-00082-1>
- Thabet, A. F., Boraie, H. A., Galal, O. A., El-Samahy, M. F. M., Mousa, K. M., Zhang, Y. Z., ... Nozaki, T. (2021). Silica nanoparticles as pesticide against insects of different feeding types and their non-target attraction of predators. *Scientific Reports*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93518-9>
- Tortorici, S., Cimino, C., Ricupero, M., Musumeci, T., Biondi, A., Siscaro, G., ... Zappalà, L. (2022). Nanostructured lipid carriers of essential oils as potential tools for the sustainable control of insect pests. *Industrial Crops and Products*.
- Tseng, W. Bin, Hsieh, M. M., Chen, C. H., Chiu, T. C., & Tseng, W. L. (2020). Functionalized gold nanoparticles for sensing of pesticides: A review. *Journal of Food and Drug Analysis*, 28(4), 521–538. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.1092>
- Üner, M., & Yener, G. (2007). Importance of solid lipid nanoparticles (SLN) in various administration routes and future perspective. *International Journal of Nanomedicine*, 2(3), 289–300.
- Ur Rahim, H., Qaswar, M., Uddin, M., Giannini, C., Herrera, M. L., & Rea, G. (2021). Nano-enable materials promoting sustainability and resilience in modern agriculture. *Nanomaterials*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/nano11082068>
- Walker, G. W., Kookana, R. S., Smith, N. E., Kah, M., Doolette, C. L., Reeves, P. T., ... Navarro, D. A. (2018). Ecological Risk Assessment of Nano-enabled Pesticides: A Perspective on Problem Formulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6480–6486. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02373>

- Wang, C., Cui, B., Zhao, X., Zeng, Z., Wang, Y., Sun, C., ... Cui, H. (2021). Preparation and characterization of efficient and safe lambda-cyhalothrin nanoparticles with tunable particle size. *Pest Management Science*, 77(4), 2078–2086. <https://doi.org/10.1002/ps.6236>
- Wang, G., Xiao, Y., Xu, H., Hu, P., Liang, W., Xie, L., & Jia, J. (2018). Development of Multifunctional Avermectin Poly(succinimide) Nanoparticles to Improve Bioactivity and Transportation in Rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(43), 11244–11253. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03295>
- Xiang, H., Xia, M., Cunningham, A., Chen, W., Sun, B., & Zhu, M. (2017). Mechanical properties of biocompatible clay/P(MEO2MA-co-OEGMA) nanocomposite hydrogels. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 72(April), 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.04.026>
- Xu, Z., Tang, T., Lin, Q., Yu, J., Zhang, C., Zhao, X., ... Li, L. (2022). Environmental risks and the potential benefits of nanopesticides: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(3), 2097–2108. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01338-0>
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A., & Munné-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289(September). <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>