REVISTA
DO INSTITUTO DE LATICÍNIOS CÂNDIDO TOSTES
v. 77, n. 3, jul-set 2022

Revisão DOI: 10.14295/2238-6416.v77i3.880

APLICAÇÃO DA NANOBIOTECNOLOGIA NA INDÚSTRIA LÁCTEA: DA PRODUÇÃO AO CONSUMO

Application of nanobiotechnology in the dairy industry: From production to consumption

Thacila Fernanda de Oliveira[1], Flávio Yukio Mendes Haratani[1], Marizia Trevizani[2], Laís Lopardi Leal[2], Fabiano Freire Costa[1]*

RESUMO

A nanotecnologia é a aplicação tecnológica da nanociência, onde nanoestruturas estão sendo desenvolvidas e aplicadas em diversas áreas. Já a nanobiotecnologia é um ramo desta ciência que engloba as grandes áreas da Engenharia e Biologia Molecular, desenvolvendo dispositivos para análises biológicas e químicas. Na indústria de alimentos, essa tecnologia visa aumentar a produção, a vida útil, a biodisponibilidade de nutrientes e pode ser aplicada na fabricação de embalagens. Além disso, os nanomateriais podem ser utilizados como sensores no diagnóstico de qualidade e segurança alimentar, bem como potenciais substitutos aos conservantes alimentícios tradicionais. Dessa forma, o objetivo do estudo em questão é evidenciar as aplicações da nanobiotecnologia no setor lácteo, em toda cadeia de produção até o consumo. Assim, foi constatado durante o estudo: a utilização de nanomateriais na cadeia produtiva, na substituição de conservantes tradicionais, no desenvolvimento de embalagens, no monitoramento da qualidade e na detecção de contaminantes nos produtos lácteos. Portanto, é notável que as aplicações e os impactos dessa tecnologia são inquestionáveis devido ao seu grande potencial, revelando um futuro promissor em tanto na indústria láctea quanto em outros setores.

Palavras-chave: nanomateriais, indústria laticinista, desenvolvimento, novos produtos e processos.

ABSTRACT

Nanotechnology is the technological application of nanoscience, where nanostructures are being developed and applied in several areas. Nanobiotechnology is a branch of this science that encompasses the broad areas of Engineering and Molecular Biology, developing devices for biological and chemical analysis. In the food industry, this technology aims to increase production, shelf life, and bioavailability of nutrients and can be applied in the manufacture of packaging. In addition, nanomaterials can be used as sensors in the diagnosis of food quality and safety, as well as potential substitutes for traditional food preservatives. Thus, the objective of

1 Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Farmácia, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, 36036-900, Juiz de Fora, MG, Brasil. E-mail: fabianofreirecosta@gmail.com
2 Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas, Juiz de Fora, MG, Brasil.

*Autor para correspondência

Recebido / Received: 05/08/2021 Aprovado / Approved: 28/03/2022

the study in question is to highlight the applications of nanobiotechnology in the dairy sector, throughout the production chain to consumption. Thus, it was found during this study that the use of nanomaterials has been applied in the production chain, in the replacement of traditional preservatives, in the development of packaging, in the monitoring of quality, and in the detection of contaminants in dairy products. Therefore, it is remarkable that the applications and impacts of this technology are unquestionable due to its great potential, revealing a promising future in the dairy industry and other sectors.

Keywords: nanomaterials, dairy industry, development, new products and processes

INTRODUÇÃO

Nanociência é a interseção da área da física, biologia e ciências dos materiais, com a finalidade de estudar as estruturas moleculares em escala nanométrica (1 nm a 100 nm). O *National Nanotechnology Initiative* determina que nanociência e nanotecnologia "envolvem a capacidade de ver e controlar átomos e moléculas individuais" e "podem ser usadas em campos como química, biologia, física, ciência dos materiais e engenharia". Esta é uma das diferentes formas de desenvolver e usar materiais, estruturas, dispositivos e sistemas com novas propriedades e funções, diferentes daquelas quando em escalas maiores, exatamente devido ao seu arranjo na escala de nanômetros (SANTAMARIA, 2012).

Para um material ser considerado nano, deve ser constituído por partículas ou aglomerados de partículas com distribuição de tamanho compreendendo 50% ou mais dessas partículas contendo uma ou mais dimensões no intervalo de 1 nm a 100 nm (COMISSÃO EUROPEIA, 2011). Torna-se importante salientar que a nanotecnologia se relaciona à manipulação controlada dos nanomateriais estruturados e/ou organizados pelo homem (SCHULZ, 2013).

Na literatura, os nanomateriais podem ser classificados de acordo com o número de dimensões, onde pelo menos uma dimensão encontra-se compreendida na escala nanométrica, ou com segundo sua composição. Dessa forma, quanto à dimensão, os nanomateriais são classificados em: 0 dimensional (0D), como as nanopartículas, Quantum dots; unidimensional (1D), nanotubos, nanofilamentos e nanofibras; bidimensional (2D), são os nanofilmes/nanofolhas e nano-revestimentos; e tridimensional (3D), os maciços (GONÇALVES, 2012). Em relação à composição ou propriedades físico-químicas, estes podem ser enquadrados como baseados em carbono [L1], como fulerenos, nanotubos de carbono, grafeno, entre outros; metálicos [L2], de titânio, ouro, prata, chumbo, cobre, zinco, ferro, cério e seus óxidos correspondentes, *nanoclusters* de metal, nanotubos de parede única preenchidos com metal, entre outros; orgânicos, como os lipossomas e nanoemulsões, ou poliméricos [L3], como os dendrímeros (PRAJITHA *et al*., 2019).

O desenvolvimento de abordagens para nanofabricação possui grande importância, assim como as reais e potenciais aplicações da nanotecnologia, uma vez que devem permitir com precisão atômica a síntese e processamento de nanomateriais com propriedades estruturais, mecânicas, magnéticas desejadas e adequadas (BISWAS *et al*., 2012). Dessa forma, a literatura destaca duas diferentes abordagens para a síntese de partículas nanoestruturadas: abordagem *top-down* e abordagem *bottom-up*. Estas se diferenciam em grau de qualidade, velocidade e custo (BAYDA *et al*., 2020). A abordagem *top-down*, utilizando ferramentas controladas por parâmetros experimentais externos, parte de materiais ou estruturas com escala maior reduzindo-os até as dimensões desejadas. A técnica [L5] incluída nesse tópico é litografia de nanoimpressão e litografia de copolímero em bloco, que diferem quanto a resolução da estrutura final nanofabricada. Em contrapartida, a abordagem *bottom-up* parte da montagem componentes moleculares ou atômicos até adquirirem dimensões nanométricas complexas pretendidas. Essa categoria depende da capacidade de automontagem desses componentes(*self-assembly*), de forma controlada, sem desperdício e sem necessidade de confecção ou eliminação de partes do sistema final, como é o caso da categoria anterior. Deposição de camada atômica, nanofabricação sol-gel, automontagem molecular, deposição de nanomateriais na fase de vapor e estrutura de DNA para nanoeletrônica são algumas

das técnicas aplicadas na abordagem *bottom-up* (BISWAS *et al*., 2012).

Além dessas abordagens que compreendem em técnicas químicas e física, as nanopartículas podem ser sintetizadas em organismos biológicos, denominado de biossíntese ou nanobiotecnologia verde. Isso, pois sua principal finalidade é sintetizar de forma limpa, não tóxica e sem malefícios ao meio ambiente. A literatura relata diversos estudos utilizando microrganismos, como procariotos (bactérias e actinomicetos) e eucariotos (leveduras, fungos e plantas), para a síntese de diferentes nanopartículas (PUGAZHENTHIRAN *et al*., 2009; SALVADORI *et al*., 2014; LUO *et al*., 2015).

REVISÃO DE LITERATURA

A nanotecnologia teve seu *boom* com o desenvolvimento e a acessibilidade de ferramentas que permitiram aos cientistas enxergarem o que antes eles não eram capazes de ver (SANTAMARIA, 2012). Dessa forma, não só a identificação, como também a caracterização desses nanomateriais foi possível a partir do surgimento dessas ferramentas sofisticadas, chamadas microscópios. As microscopias mais utilizadas na nanotecnologia para a determinação da forma e tamanho são: microscopia de tunelamento de varredura, microscopia de força atômica, microscopia de varredura por sonda, microscopia de transmissão e microscopia de eletrônica de varredura (SANTAMARIA, 2012; BAYDA *et al*., 2020; OTUBO, 2006).

Além destas, outras técnicas são empregadas de forma a complementar a informações fornecidas pelas microscopias, a fim de determinar a estrutura e composição dos nanomateriais, as quais são: espectrometria de massas (fornece a massa das nanoestruturas), espectroscopia de absorção de raios X (informações quanto ao estado de oxidação dos átomos e a distância interatômica), espectroscopia de absorção UV-Vis (investiga as propriedades eletrônicas das nanopartículas) e a termogravimetria (caracteriza as propriedades térmicas, informando qual fenômeno é responsável pelas alterações das propriedades dos materiais e em quais temperaturas ocorrem) (OTUBO, 2006; GOMES, 2015).

Por fim, mas com importância significativa, as nanopartículas ou nanomateriais devem ser caracterizados quanto ao seu potencial zeta, (relacionado à carga superficial da nanopartícula em suspensão, é o potencial eletrostático quando a nanopartícula se move pelo meio criando uma distinção entre os contra-íons na camada difusa juntos à nanopartícula e os íons que permanecem com o dispersante) uma vez que indica o comportamento destas frente às membranas celulares. Assim, nanopartículas compreendendo potencial zeta maiores que +30 mV ou menores que -30 mV são consideradas catiônicas e aniônicas, com potencial zeta entre -10 e +10 mV são neutras (CLOGSTON; PATRI, 2011).

Em relação à caracterização do nanomaterial ou nanopartícula, a escolha da técnica deve levar em conta a resolução e o tipo de informação que cada uma oferece, bem como devem ser complementares (OTUBO, 2006). Já é bem estabelecido no meio científico que na escala nano as propriedades fundamentais dos materiais são dependentes do tamanho e da forma, e não apenas da composição, como é o caso dos micromateriais, onde suas propriedades são, também, observadas na escala macro (GONÇALVES, 2012). As propriedades de cada material são manifestadas a partir de um tamanho que recebe o nome de crítico. Assim, quando o tamanho das partículas do material está abaixo dessa faixa chamada de crítica, as propriedades mudam; ademais, cada propriedade de um mesmo material possui um tamanho crítico diferente, bem como para uma mesma propriedade, o tamanho crítico é diferente para diferentes materiais. Em paralelo, a forma das partículas, quando abaixo do tamanho crítico, também influencia as propriedades dos materiais (ZARBIN, 2007).

Como é de conhecimento geral, quanto menor o tamanho, maior a área de superfície. Nesse sentido, nanomateriais e nanopartículas, que possuem tamanho abaixo do crítico, apresentam área de superfície maior por unidade de massa. Isso lhes confere uma quantidade maior de grupos funcionais reativos na superfície, aumentando, portanto, sua reatividade química (PRAJITHA *et al*., 2019). A partir dos anos 2000, então, preocupações por parte dos cientistas, agências reguladoras e não governamentais sobre os potenciais efeitos e, consequentemente, riscos para a saúde humana e ambiental começaram a surgir. Preocupações estas exatamente devido ao tamanho nanométrico dessas partículas e a maior

área de superfície que aumentam sua reatividade, potencial de disponibilidade sistêmica e ocorrência ambiental. Em virtude de suas propriedades físico-químicas, os nanomateriais, podem modificar a ligação de proteínas, captação celular e causar lesão tecidual quando em contato com o corpo humano (SANTAMARIA, 2012).

A nanotecnologia vem sendo desenvolvida e aplicada em diversas áreas; como na biologia, no diagnóstico (detecção de biomarcadores através de *nanobiochips*, nanoeletrodos ou nanobiossensores), "nanofármacos" (gene e *drug delivery*, medicina regenerativa, tratamento do câncer etc.) e imagem molecular (sondas, agentes de contraste em tomografia computadorizada, imagem óptica); no ambiente, gerando menos poluição durante a fabricação de materiais, através da limpeza de produtos químicos orgânicos que poluem as águas subterrâneas e de compostos orgânicos voláteis do ar; na energia, produzindo energia mais eficiente, econômica e limpa, por meio da construção de uma nova geração de células solares; na indústria de construção, em tintas e cimento; na indústria de cosméticos, podendo tornar o produto mais solúvel em meio aquoso e com maior absorção pela pele; e na indústria de alimentos, em toda a cadeia de produção e processamento, vida útil, disponibilidade de nutrientes, fabricação de embalagens (materiais melhorados, "ativos" ou "inteligentes") e diagnóstico de qualidade e segurança alimentar (nanosensores) (CHAUDHRY *et al*., 2008; NOUVELLES, 2010; NEGRELLO; MATHIAS, 2012; BAYDA *et al*., 2020; PRAJITHA *et al*., 2019).

Inovação

No âmbito científico atual, o uso da matéria em escala nanométrica vem ganhando cada vez mais espaço. Os impactos dessa tecnologia são inquestionáveis devido ao seu grande potencial, revelando um futuro promissor (VALENTE *et al*., 2014). Dentre as definições de nanobiotecnologia, temos a de que se trata da interseção entre as grandes áreas de Engenharia e Biologia Molecular, permitindo o desenvolvimento de uma nova classe de dispositivos com maior sensibilidade e especificidade para análises biológicas e químicas (FORTINA *et al*., 2005). As aplicações da nanobiotecnologia abrangem diversas áreas como a militar, no que tange a armamentos em geral; cosmetologia, melhorando a performance dos componentes de cada formulação; eletrônica com os nanotubos de carbono; agropecuária e alimentícia, com desenvolvimento de nanosensores para melhoria de detecção de patógenos, embalagens ativas proporcionando a segurança dos alimentos (MAZZEO; SANTOS, 2018).

No setor alimentício, a nanobiotecnologia se insere nas seguintes categorias: 1) os ingredientes alimentares podem ser processados ou formulados em nanoestruturas; 2) uso de aditivos nanoparticulados, nano-dimensionados, nano-encapsulados ou nanoestruturados; 3) incorporação de nanomateriais para fabricação de materiais melhorados, "ativos" ou "inteligentes" usados no desenvolvimento de embalagens; e 4) dispositivos e materiais baseados em nanotecnologia para fins de segurança alimentar a rastreabilidade, como nanosensores e nanofiltração (CHAUDHRY *et al*., 2008).

Setor agropecuário e alimentício

O setor de agropecuária do Brasil eleva seus níveis de produção a cada ano. As projeções são otimistas, revelando um grande potencial do Brasil ser o maior fornecedor de alimentos do futuro. As exportações são significativas e no *ranking* dos alimentos que geram altos faturamentos estão a soja, carne bovina, milho e leite (CNA, 2020). As indústrias lácteas brasileiras apresentam uma parcela de impacto na economia do país. Nestlé, Danone, Vigor, Jussara, entre outras, estão entre as maiores em nosso território, com crescente evolução no volume de leite produzido a cada ano (MORELLI *et al*., 2020). Todo esse crescimento está ligado à transformação na cadeia produtiva, cada vez mais tecnológica e adaptada para que a produção seja segura e proporcional ao consumo populacional (EMBRAPA, 2020).

A nanotecnologia no setor alimentício é uma ferramenta de design e desenvolvimento de conservantes de alimentos e atua como uma alternativa aos alimentos convencionais. Dessa forma, há estudos (McCLEMENTS *et al*., 2011; MA *et al*., 2013; ZOU *et al*., 2015; GUPTA *et al*., 2016) que exploram essa interface entre nanotecnologia e conservação de alimentos, gerando impactos na produção, processamento, armazenamento,

transporte e segurança de alimentos. Entretanto, estudos acerca dos fatores de biologia molecular que contribuem para a ação desses nanoconservantes são limitados na literatura, assim como os aspectos biomédicos dessas nanopartículas na saúde do consumidor (BHUYAN *et al*., 2019). Apesar de muitas lacunas, a aplicação dos nanomateriais vem crescendo no meio científico.

Setor de embalagens

O filme de polímero de propileno desenvolvido por Ellahi *et al*. (2020), revestido com óleo essencial da goma da árvore de Pistacia atlântica (pistache selvagem) encapsulados por nanopartículas de sílica, demonstrou atividades significativas contra bactérias como S. *aureus*, *Salmonella*, E. *coli* e L. *monocytogenes*. Assim, os autores observaram que o óleo essencial reduziu o crescimento de todas as bactérias testadas durante os tempos de armazenamento testados (1, 3, 7 14, 21, 28 e 35 dias). Ainda, a presença das nanopartículas de sílica teve influência sobre o tempo de vida útil do leite, por agir como uma plataforma de liberação controlada do óleo essencial com o passar do tempo.

Buscando monitorar o frescor do leite, Ma *et al*., (2020) desenvolveram nanopartículas de gelatina/quitosana incorporadas com antocianinas de mirtilo. Isso devido ao fato de que as nanopartículas estudadas são responsivas à mudança de pH do leite, influenciando na taxa de liberação das antocianinas para o meio (taxa de liberação maior em meio ácido), bem como as antocianinas, que mudam de cor de acordo com o pH (vermelho em pH < 7 e roxo e azul escuro em pH > 8). O leite possui três estágios de deterioração: leite fresco (pH = 6,42), leite estragando (pH = 5,46) e leite estragado (pH = 4,77). Dessa forma, o leite estragado (pH = 4,77) liberou mais antocianinas para o meio e, consequentemente, exibiu uma cor avermelhada, enquanto a cor do leite fresco não mudou; fornecendo, então, uma possibilidade para o monitoramento dinâmico das mudanças na qualidade do leite para consumo (MA *et al*., 2020).

Setor de processamento

Mesmo sendo considerado um alimento rico e amplamente utilizado em todas as fases da vida pelo ser humano, o leite e outros produtos lácteos podem ser adulterados ou contaminados durante o processamento e o acondicionamento em embalagens. Ademais, há a falta de testes de baixo custo que comprovem a perecibilidade do produto lácteo (AZAD; AHMED, 2016). Alguns exemplos de toxinas e microrganismos que podem ser encontradas em produtos lácteos são: bisfenol A (BPA), aflatoxina, melamina, entre outros (GIRIGOSWAMI *et al*., 2021).

Outra substância que pode ser encontrada em produtos lácteos é a melamina, utilizada ilegalmente para aumentar o nível de nitrogênio em produtos lácteos, demonstra potencial para causar distúrbios endocrinológicos e neurológicos (BOLDEN *et al*., 2017).

Projeções e sustentabilidade

No cenário do setor alimentício e científico atual, se discute sobre aplicações de estruturas com funcionalidades especiais que possam aperfeiçoar determinados alimentos agregando alguma função específica ao mesmo. Graveland-Bikker; Kruif, (2006), expõe sobre nanotubos de alfa lactoalbumina, uma proteína do soro do leite. Os nanotubos consistem em vários produtos de hidrólise, apresentam estabilidade sob diversas condições e são capazes de resistir a situações semelhantes a uma etapa de pasteurização do leite. Por possuírem uma cavidade, podem servir como veículos para compostos encapsulados como vitaminas e enzimas, agregando valor ao alimento. Uma outra aplicação de nanobiotecnologia em alimentos seria o uso de proteínas do leite para encapsulação de probióticos ou outros materiais transportadores nutracêuticos (NAG *et al*., 2011). As proteínas lácteas possuem elevado valor nutricional e excelente gelificação, formação de espuma e capacidade de ligação de água, tornando-as adequadas para essa aplicação.

Nogueira *et al*. (2020) descreveram a encapsulação de compostos fenólicos da jabuticaba (*Plinia jaboticaba*) por secagem por atomização utilizando como agente encapsulante as micelas de caseína, demonstrando este uso potencial de moléculas de caseína reticuladas como agentes de encapsulação em condições altamente ácidas. No estudo de Rocha *et al*. (2019), foi realizada a microencapsulação de extratos fenólicos de jussara,

mirtilo e jabuticaba por *spray drying* usando maltodextrina, goma arábica e concentrado de proteínas de soro de leite (WPC) como materiais de parede. Com este trabalho foi possível observar a capacidade desses compostos fenólicos serem utilizados na indústria alimentícia e cosmética como corantes, principalmente as antocianinas, que tem sua estabilidade melhorada com a microencapsulação.

As pesquisas sobre a nanobiotecnologia além de serem focadas no desenvolvimento na área acadêmica e de novos produtos para a indústria, são também uma forma de explorar novas ideias que irão garantir o futuro sustentável que a humanidade tanto necessita e busca. Temos exemplos de alternativas na escala nano sendo utilizadas para detectar e, talvez, remediar problemas causados pela ação humana na natureza. Além disso, para evitar adicionar mais problemas de poluição e toxicidade na natureza, também é importante a pesquisa dos possíveis efeitos toxicológicos das nanotecnologias que apresentarem potencial nessas áreas (BORELLI, 2016).

Uma das áreas dos estudos de remediação do meio ambiente com a nanotecnologia é na despoluição de corpos d'água e no tratamento da água captada destes, seja para recuperação ambiental ou para direto e indireto da população. Nesta área, são diversas as nanotecnologias já utilizadas e ainda em pesquisa para tratar a água, como por exemplo a adsorção, que irá utilizar nanomateriais orgânicos ou inorgânicos para degradar substâncias contaminantes ou atraí-las de forma que possam ser removidas, ou a fotocatálise que apresenta propriedades bactericidas, fungicidas e até mesmo antivirais. Estas e algumas outras técnicas ainda possuem a vantagem de permitirem aplicação *in situ*, o que facilitaria em seus usos para remediação na natureza, não só em estações de tratamento (SILVEIRA; FOLADORI, 2016).

Além disso, outros processos podem ser otimizados a partir do uso de nanoprocessos e estruturas. A fotocatálise, que já foi mencionada, também pode ser usada na produção energética através da produção de hidrogênio na degradação de biomassas. Também se tem o desenvolvimento de novas nanoestruturas de síntese simples e barata para produção de células fotovoltaicas mais efetivas, com ampla faixa de absorção de luz e que tornem possível a construção de painéis solares flexíveis. E um dos ramos mais consumistas e poluidor também, a Construção Civil, também está sendo alvo de pesquisas que irão reduzir o consumo de água das obras, assim como diminuir a emissão de CO_2 destas, e melhorar e agilizar as construções realizadas (SILVEIRA; FOLADORI, 2016; FORNASIER; ROGERIO, 2015; COELHO, 2018).

Através da nanobiotecnologia estão sendo desenvolvidos materiais inteligentes e amigáveis ao meio ambiente. Também pode-se usar de nanoestruturas na área analítica, para uso tanto industrial quanto na monitoração na natureza, de forma a conseguir detectores em tempo real, por exemplo no controle de qualidade de medicamentos, ou para verificar a qualidade da água que é descartada por uma indústria ou que já esteja em corpos d'água, detectando contaminantes e microrganismos patógenos (BORELLI, 2016).

Na agricultura, agropecuária, e até mesmo na área agroflorestal, importantes avanços científicos nanobiotecnológicos vêm aparecendo de várias formas diferentes. Há pesquisas com os chamados nanofertilizantes, que são alternativas para a aplicação mais eficiente e controlada dos diversos insumos utilizados na agricultura, e também de nanossensores que poderão indicar quando uma plantação começa a apresentar algum problema, como as pragas e doenças. Existem também, pesquisas que se utilizam de micélios para a produção de nanopartículas que sejam de interesse, ou que buscam sistemas nanoparticulados para a melhor administração de fármacos e vacinas em animais de criação, ou mesmo usar a nanobiotecnologia para a sexagem de um rebanho na agropecuária (DINIZ, 2014; IAVICOLI *et al*., 2017).

Também existem estudos investigando a utilização de subprodutos naturais destas produções para a síntese de nanomateriais. Estas pesquisas indicam que estes resíduos, principalmente de origem vegetal, mas alguns de origem animal, apresentariam oportunidades para uma síntese mais sustentável, capaz de possibilitar um uso menor de materiais nocivos aos seres vivos em geral. Além disso, o uso destes resíduos iria diminuir o impacto que estes teriam com o descarte, e também teriam benefícios econômicos, com a agregação de valor a estes materiais, e sociais, com a geração de novas atividades, além de também haver benefícios ambientais e para a

agricultura sustentável. Alguns destes materiais já estão despertando um interesse maior ainda, como por exemplo a nanocelulose, que está disponível de forma abundante e renovável. Estudos com a nanocelulose relatam a boa biodegradabilidade, seu uso em camadas protetoras para plantas, sementes e alimentos, e até mesmo a possibilidade de ser utilizada de forma adsorvente na remediação da água devido a suas propriedades físico-químicas e estruturais, além de ser biocompatível e inerte no meio ambiente, o que justifica o quanto a comunidade científica tem sido atraída pela nanocelulose e pela busca de novos materiais com propriedades similares (DINIZ, 2014; IAVICOLI *et al*., 2017).

Porém, antes que grande parte destas tecnologias sejam definitivamente aprovadas para uso em larga escala, são necessários mais estudos acerca dos riscos que as nanopartículas possam causar ao homem e ao ecossistema. Estas moléculas, por vezes, podem ter uma reatividade química maior e, portanto, deve ser feita a investigação das propriedades físico-químicas, biológicas, toxicológicas e ecotoxicológicas que estas podem apresentar. Também, devem ser analisados o cido de vida das nanoestruturas, e até mesmo a possibilidade de que as nanotecnologias que atuem de forma a absorver certos contaminantes, se tornem uma forma de carreamento destes para outros locais. Além disso, de forma mais geral, foram levantadas preocupações nas mais variadas áreas sobre os efeitos da nanobiotecnologia, como sobre a biodiversidade, a estabilidade da engenharia ambiental, a genética, além de outros problemas incluindo os sociais e políticos, e essa variedade significa até mesmo que os cientistas da área ainda não chegaram a um consenso completo dos possíveis riscos da nanobiotecnologia. Isso revela a necessidade da continuação e incentivo de pesquisas relacionadas ao tema e que levem em consideração todas as possíveis variáveis que seriam encontradas em cada ecossistema, para que se tenha um entendimento completo de como as nanopartículas se comportam na natureza (SILVEIRA; FOLADORI, 2016; BORELLI, 2016; IAVICOLI *et al*., 2017).

O aumento populacional estimado para os próximos anos e as variações de caráter ambiental, tanto dos fatores sustentáveis quanto climáticos tem impulsionado as pesquisas do setor alimentício, que tem evoluído de maneira crescente nos últimos anos (MARTINS, 2015). É evidente que toda tecnologia agrega valor a determinado produto, sendo ele para fins alimentícios ou não. Apesar dos problemas de estabilidade, armazenamento e vida de prateleira, entre outros, serem solucionados com esse tipo de tecnologia, ainda não se sabe se os produtos lácteos nanobiotecnológicos serão todos acessíveis. É necessário estratégia e estudos do mercado consumidor para que se possa tornar disponível para compra produtos que, além de inovadores e acrescidos de nanobiotecnologia, sejam também de fácil acesso e contenham as qualidades desejadas pelo consumidor (SILVA *et al*., 2012).

Neste ínterim, enquanto as pesquisas avançam e nem todas as informações são publicadas de forma clara para a população geral, estudos avaliam a atual aceitação da nanotecnologia no setor alimentício. O estudo de Zhou; Hu, (2018) pesquisou nos E.U.A. a aceitação de diferentes produtos baseados em óleo de canola, com a nanotecnologia aplicada de formas diferentes, e o quanto os consumidores estariam dispostos a pagar por estes produtos. E também estudos como os de Siegrist; Hartmann, (2020), Rahim *et al.* (2019) e Henchion *et al.*, (2019), avaliaram os principais fatores que podem afetar a aceitação da nanotecnologia em alimentos nos E.U.A., Malásia e Irlanda, respectivamente. Os resultados destes estudos indicam que a população concorda em sua maioria que a tecnologia traz facilidades e confortos, mas a falta de conhecimento sobre a nanotecnologia impede que grande parte dos consumidores forme uma opinião sobre o assunto, o que prejudica a aceitação de produtos que envolvam a nanotecnologia (RAHIM *et al.*, 2019; SIEGRIST; HARTMANN, 2020).

Este apoio governamental ao desenvolvimento e divulgação da nanotecnologia é perceptível em vários países. Porém, como esta é uma área relativamente nova da pesquisa, e são constantes os estudos, descobertas e criações de novos nanoprodutos, nanoprocessos e suas propriedades, ainda não há uma base científica considerada completa e concreta o suficiente para que sejam criadas legislações específicas e adequadas para a área, estando estas ainda em seus estágios iniciais, com a agência regulatória da União Europeia, a *Registration, Evaluation, Authorisation, and Restriction of Chemicals* (REACH), sendo a mais ativa do

mundo em relação à legislação da nanotecnologia em alimentos, seguida pelo *Food and Drug Administration* (FDA) dos E.U.A. (HE *et al.*, 2019). No Brasil, o Marco Legal da Nanotecnologia (PL 880/2019) ainda está em tramitação. Obteve aprovação em 2020 pela Comissão de Constituição e Justiça (CCJ) e está em análise da Comissão de Ciência e Tecnologia (CCT).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo de todo o artigo pudemos observar tamanhos benefícios na utilização de biotecnologia aplicada em escala nanométrica, que não se restringe somente à indústria láctea e alimentícia. Entretanto, sua acessibilidade ainda é discutida já que todos esses avanços tecnológicos, agora contidos em produtos típicos do dia a dia, agregam valor significativo em todo o processo industrial e também ao produto final. A aplicação da nanobiotecnologia na indústria láctea encontra-se em crescente evolução. A nanotecnologia está presente nas estruturas básicas do leite, como as micelas de caseína, moléculas de gordura e soroproteínas, nanomoléculas importantes para a produção de derivados lácteos como manteiga, sorvetes e queijos (DURÇO *et al*., 2020). Entretanto, ainda há muito a ser feito para que descobertas científicas nessa área possam realmente ser aplicadas e possam estar disponíveis nos estabelecimentos comerciais brasileiros. Somado a esses desafios, ainda devemos considerar o advento da Indústria 4.0, englobando tecnologias avançadas que estão mudando as formas de produção e de negócios, que, aliada à sustentabilidade, é capaz de prover produtos melhores e mais seguros para toda população.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo fornecimento da Bolsa de Iniciação Científica (BIC) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AZAD, T.; AHMED, S. Common milk adulteration and their detection techniques. **International Journal of Food Contamination**, v. 3, n. 22, 2016. DOI 10.1186/s40550-016-0045-3

BAYDA, S. *et al.* The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. **Molecules**, v. 25, n. 1, p. 112, 2020. DOI: 10.3390/molecules25010112

BHUYAN, D.; GREENE, G. W.; DAS, R. K. Prospects and application of nanobiotechnology in food preservation: molecular perspectives. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 39, n. 6, p. 759-778, 2019. DOI: 10.1080/07388551.2019.1616668

BISWAS, A. *et al*. Advances in top-down and bottom-up surface nanofabrication: techniques, applications & future prospects. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 170, n. 1-2, p. 2-27, 2012. DOI: 10.1016/j.cis.2011.11.001

BOLDEN, A. L.; ROCHESTER, J. R.; KWIATKOWSKI, C. F. Melamine, beyond the kidney: a ubiquitous endocrine disruptor and neurotoxicant? **Toxicology Letters**, v. 280, n. 5, p. 181-189, 2017.

BORELLI, E. Nanotecnologia: inovação e sustentabilidade. *In:* SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 4., 2016. **Resumos [...]**. São Paulo, 2016.

CHAUDHRY, Q. *et al.* Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. **Food Additives & Contaminants**, v. 25, n. 3, p. 241-258, 2008. DOI: 10.1080/02652030701744538

CLOGSTON, J. D.; PATRI, A. K. Zeta potential measurement. *In*: McNEIL, S. E. (ed.). **Characterization of nanoparticles intended for drug delivery**. Totowa: Humana Press. 2011, p. 63-70.

CNA. Panorama do Agro. 2020. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro. Acesso em: 08 fev. 2023

COELHO, E. **Nanotecnologia a serviço da sustentabilidade na construção**. Associação de Dirigentes de Empresas do Mercado Imobiliário da Bahia (ADEMI-BA), 2018. Disponível em: ademi-ba.com.br/Site/Noticia/nanotecnologia-a-servico-da-sustentabilidade-na-construcao. Acesso em: 20 abr. 2021

COMISSÃO EUROPEIA. Recomendação da comissão de 18 de outubro de 2011 sobre a definição de nanomaterial (2011/696/UE). **Jornal Oficial da União Europeia**, v. 275, p. 38-40, 2011.

DINIZ, F. **Nanotecnologia verde provoca revolução sustentável na agricultura.** EMBRAPA, 2014. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia

/1975958/nanotecnologia-verde-provoca-revolucao-sustentavel-na-agricultura. Acesso em: 14 abr. 2021.

DURÇO, B. B. *et al.* **Como a nanotecnologia pode ser utilizada na indústria láctea?** Portal **MilkPoint**. 2020. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/artigos/industria-de-laticinios/como-a-nanotecnologia-pode-ser-utilizada-na-industria-lactea-219251/. Acesso em: 06 jan. 2022.

ELLAHI, H. *et al.,* Application of essential oil of *Pistacia atlantica* Gum, polypropylene and silica nanoparticles as a new milk packaging. **Food Science & Nutrition**, v. 8, n. 8, p. 4037-4043, 2020. DOI: 10.1002/fsn3.1660

EMBRAPA. **Anuário Leite 2020**: leite de vacas felizes. 104 p. Disponível em: www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1124722/anuario-leite-2020-leite-de-vacas-felizes. Acesso em: 08 fev. 2023

FORNASIER, M. O; ROGERIO, M. S. Nanotecnologias e desenvolvimento sustentável: implicações tecnológicas aos direitos fundamentais. **Revista de Estudos Jurídicos UNESP**, v. 19, n. 29, p. 1-20, 2015. DOI: 10.22171/rej.v19i29.1528

FORTINA, P. *et al*. Nanobiotechnology: the promise and reality of new approaches to molecular recognition. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 4, p. 168-173, 2005. DOI: 10.1016/j.tibtech.2005.02.007

GIRIGOSWAMI, A. *et al*. Nanotechnology in detection of food toxins – focus on the dairy products. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 11, n. 6, p. 14155-14172, 2021. DOI: 10.33263/BRIAC116.1415514172

GOMES, P. B. **Caracterização de materiais**: uma abordagem das possibilidades de algumas técnicas instrumentais. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2015.

GONÇALVES, M. C. Nanomateriais. *In*: GONÇALVES, M. C.; MARGARIDO, F. **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. Lisboa: IST Press, 2012. p. 725-771.

GRAVELAND-BIKKER, J. F.; KRUIF, C. G. Unique milk protein based nanotubes: food and nanotechnology meet. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 5, p. 196-203, 2006. DOI: 10.1016/j.tifs.2005.12.009

GUPTA, A. *et al.* Nanoemulsions: formation, properties and applications. **Soft Matter**, v. 12, p. 2826-2841, 2016. DOI: 10.1039/C5SM02958A

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. DOI: 10.1016/j.jfda.2018.12.002

HENCHION, M. *et al.* Big issues for a small technology: consumer trade-offs in acceptance of nanotechnology in food. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, n. 58, e102210, 2019. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102210

IAVICOLI, I. *et al*. Nanotechnology in agriculture: opportunities, toxicological implications, and occupational risks. **Toxicology and Applied Pharmacology**, v. 329, p. 96-111, 2017. DOI: 10.1016/j.taap.2017.05.025

LUO, C-H.; SHANMUGAM, V.; YEH, C-S. Nanoparticle biosynthesis using unicellular and subcellular supports. **NPG Asia Materials**, v. 7, n. e209, 2015. DOI: 10.1038/am.2015.90

MA, Y. *et al*. Enhanced bactericidal potency of nanoliposomes by modification of the fusion activity between liposomes and bacterium. **International Journal of Nanomedicine**, v. 2013, n. 8, p. 2351-2360, 2013. DOI: 10.2147/IJN.S42617

MA, Y. *et al*. Development and optimization of dynamic gelatin/chitosan nanoparticles incorporated with blueberry anthocyanins for milk freshness monitoring. **Carbohydrate Polymers**, v. 247, n. 1, p. 116738, 2020. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116738

MARTINS *et al*. Nanotecnologia em alimentos: uma breve revisão. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 7, n. 2, p. 25-42, 2015.

MAZZEO, A.; SANTOS, E. J. C. Nanotechnology and multipotent adult progenitor cells in Reparative Medicine: therapeutic perspectives. **Einstein (São Paulo)**, v. 16, n. 4, p. 1-6, 2018. DOI: 10.31744/einstein_journal/2018rb4587

McCLEMENTS, D. J.; RAO, J. Food-grade nanoemulsions: formulation, fabrication, properties, performance, biological fate, and potential toxicity. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 51, n. 4, p. 285-330, 2011. DOI: 10.1080/10408398.2011.559558

MORELLI, M.; BEZZON, L. C.; GALAN, V. Ranking Leite Brasil 2019: captação das maiores empresas cresceu 4,1%. **Portal MilkPoint**. 2020. Disponível em: https://www.milkpoint.

com.br/noticias-e-mercado/giro-noticias/ranking-leite-brasil-2019-captacao-das-maiores-empresas-cresceu-41-219474/. Acesso em: 09 fev. 2021.

NAG, A.; HAN, K.-S.; SINGH, H. Microencapsulation of probiotic bacteria using pH-induced gelation of sodium caseinate and gellan gum. **International Dairy Journal**, v. 21, n. 4, p. 247-253, 2011. DOI: 10.1016/j.idairyj.2010.11.002

NEGRELLO, L.; MATHIAS, J. O Boticário investe R$ 14 milhões para conquistar mercado de cremes para o rosto. **LQES News**, 2012. Disponível em: https://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/pontos_vista/pontos_vista_divulgacao52-1.html. Acesso em: 10 nov. 2018.

NOGUEIRA, M. H. *et al.,* Cross-linked casein micelle used as encapsulating agent for jaboticaba (*Plinia jaboticaba*) phenolic compounds by spray drying. **International Journal of Dairy Technology**, v. 73, n. 4, p. 765-770. DOI: 10.1111/1471-0307.12704

NOUVELLES, H. Nanotecnologia e a beleza. 2010. **Revista Pesquisa FAPESP**. Disponível em: http://revistapesquisa.fapesp.br/2011/12/26/nanotecnologiabeleza-retocada/. Acesso em: 01 nov. 2018.

OTUBO, L. **Técnicas de caracterização de nanopartículas metálicas funcionalizadas**. 2005. 26 f. Monografia (Especialização) – Curso de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

PRAJITHA, N.; ATHIRA, S. S.; MOHANAN, P. V. Bio-interactions and risks of engineered nanoparticles. **Environmental Research**, v. 172, p. 98-108, 2019. DOI: 10.1016/j.envres.2019.02.003

PUGAZHENTHIRAN, N. *et al.,* Microbial synthesis of silver nanoparticles by *Bacillus* sp. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 11, n. 7, p. 1811-1815, 2009. DOI: 10.1007/s11051-009-9621-2

RAHIM, R. A. *et al.* Factors influencing nanotechnology acceptance: benefits, potential risk, government support and attitude. **Journal of Physics**: conference series, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1349/1/012114

ROCHA, J. C. G. *et al.* Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts. **Powder Technology**, v. 343, n. 1, p. 317-325, 2019. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.040

SALVADORI, M. R. *et al.* Intracellular biosynthesis and removal of copper nanoparticles by dead biomass of yeast isolated from the wastewater of a mine in the Brazilian Amazonia. **Plos One**, v. 9, n. 1, e87968, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0087968

SANTAMARIA, A. Historical overview of nanotechnology and nanotoxicology. *In*: REINEKE, J. **Methods in Molecular Biology**, Totowa: Humana Press. 2012. p. 1-12.

SCHULZ, P. A. Nanomateriais e a interface entre nanotecnologia e ambiente. **Vigilância Sanitária em Debate**, v. 1, n. 4, p. 53-58, 2013. DOI: 10.3395/vd.v1n4.67

SIEGRIST, M.; HARTMANN, C. Consumer acceptance of novel food technologies. **Nature Food**, v. 1, p. 343-350, 2020. DOI: 10.1038/s43016-020-0094-x

SILVA, T. E. M.; PREMEBIDA, A.; CALAZANS, D. Nanotecnologia aplicada aos alimentos e biocombustíveis: interações sociotécnicas e impactos sociais. **Liinc em Revista**, v. 8, n. 1, p. 207-221, 2012. DOI: 10.18617/liinc.v8i1.471

SILVEIRA, S. M. B.; FOLADORI, G. Nanotecnologia e água no Brasil. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 38, n. 2, p. 153-161, 2016. DOI: 10.4025/actascihumansoc.v38i2.32668

VALENTE, C. A. **Síntese de nanofibras de polipirrol para potencial aplicação em conduto biodegradável para regeneração nervosa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Curso de Química, Porto Alegre, 2014.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. **Química Nova**, v. 30, n. 6, p. 1469-1479, 2007. DOI: 10.1016/j.talanta.2017.10.055

ZHOU, G.; HU, W. Public acceptance of and willingness-to-pay for nanofoods in the U.S. **Food Control**, v. 89, p. 219-226, 2018. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.02.004

ZOU, L. *et al.* A novel delivery system dextran sulfate coated amphiphilic chitosan derivatives-based nanoliposome: capacity to improve in vitro digestion stability of (-)-epigallocatechin gallate. **Food Research International**, v. 69, p. 114-120, 2015. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.12.015