

2

A NANOTECNOLOGIA: DO FASCÍNIO AO RISCO¹

Juliane Altmann Berwig²

Wilson Engelmann³

- 1 Resultado parcial do projeto de pesquisa desenvolvido pelos autores intitulado: "Observatório dos Impactos Jurídicos das Nanotecnologias: em busca de elementos essenciais para o desenvolvimento do diálogo entre as Fontes do Direito a partir de indicadores de regulação às pesquisas e produção industrial com base na nano escala". (UNISINOS). Além das discussões realizadas no âmbito do Grupo de Pesquisa JUSNANO/CNPq. Apoio a Projetos de Pesquisa/MCTI/CNPQ/Universal 14/2014 – Observatório dos Impactos Jurídicos das Nanotecnologias: em busca de elementos essenciais para o desenvolvimento do diálogo entre as Fontes do Direito a partir de indicadores de regulação às pesquisas e produção industrial com base na nano escala.
- 2 Doutoranda em Direito na Universidade do Vale do Rio dos Sinos com Bolsa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo Programa de Excelência Acadêmica (Proex). Mestre em Direito pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, especialista em Direito Ambiental Nacional e Internacional pela Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul e graduada em Direito pela Universidade de Santa Cruz do Sul. Professora no curso de Direito da Universidade FEEVALE. Pesquisadora na área Ambiental com ênfase na Teoria do Risco e Nanotecnologia. Presidente da Associação Gaúcha dos Advogados de Direito Ambiental Empresarial AGAAE. Integrante da Diretoria de Grupos de Estudos da Associação Gaúcha dos Advogados do Direito Imobiliário Empresarial AGADIE e do Movimento Roessler para Defesa Ambiental de Novo Hamburgo/RS. Autora do livro *Direito dos Desastres na Exploração offshore do petróleo*. Sócia-proprietária do escritório Berwig Advocacia.
- 3 Doutor e Mestre em Direito Público pelo Programa de Pós-Graduação em Direito (Mestrado e Doutorado) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS/RS/Brasil; Professor deste mesmo Programa das atividades: "Transformações Jurídicas das Relações Privadas" (Mestrado) e "Os Desafios das Transformações Contemporâneas do Direito Privado" (Doutorado); Coordenador Executivo do Mestrado Profissional em Direito da Empresa e dos Negócios da Unisinos; Líder do Grupo de Pesquisa JUSNANO (CNPq); Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. E-mail: wengelmann@unisinos.br.

INTRODUÇÃO

A nanotecnologia revelada em nanopartículas, mesmo sem a ciência da sociedade, já há muito tempo passou a integrá-la em produtos utilizados no cotidiano da sociedade. Nos mais diversificados bens de consumo, como eletrônicos, têxteis, cosméticos, alimentos, equipamentos esportivos e materiais de construção, dentre tantos outros, contem nanotecnologia. Novas soluções são perceptíveis, a ausência de odor nas roupas de esporte, bicicletas ultraleves e resistentes, soluções na prevenção e tratamento de doenças de forma mais precisa e com redução de efeitos colaterais.

O nanomundo, desde 1959, quando Richard Feynman mencionou a nova tecnologia, tem demonstrado o seu fascínio, fazendo emergir soluções até então impensadas. Sabe-se que a tecnologia é surpreendente e poderá revolucionar a forma de organização da sociedade, facilitando muitos processos em todos os setores sociais de forma sistêmica, concomitante e interdependente.

Diante do enorme potencial para trazer benefícios para muitas áreas de pesquisa e aplicação, a nanociência está atraindo rapidamente os investimentos dos governos, empresas e universidades em muitas partes do mundo. Assim, diante dos incentivos há, como consequência, uma corrida para comercialização imediata dos produtos que contenham a nova tecnologia, ofertando ao mercado empresarial e, ao fim, aos consumidores as experiências possibilitadas pela nanotecnologia. Portanto, a nanotecnologia representa evidentemente uma nova revolução que, assim como as Revoluções Industriais anteriores, virá para transportar a linha do inimaginável em soluções tecnológicas de ponta.

Todavia, o contrário do fascínio é a cegueira aos riscos de danos, danos que podem acometer

o meio ambiente e, conseqüente, os seres humanos. Portanto, pode ser afirmado que muito já se evoluiu em suas possibilidades de aplicação da nanotecnologia, mas ainda pouco se sabe sobre os efeitos dos riscos negativos a curto, médio e longo prazo. Desta maneira, o desenvolvimento e aplicação da nanotecnologia poderá representar perigos significativos para a saúde, a segurança e o meio ambiente.

Diante deste cenário paradigmático, este artigo objetiva, utilizando-se da pesquisa bibliográfica e da matriz sistêmico-construtivista como metodologia, explanar sobre as oportunidades e riscos da nanotecnologia a partir da teoria sistêmica de Niklas Luhmann. Mediante estas informações justificar-se-á o porquê e de que maneira os riscos nanotecnológicos devem ser observados. Logo, o problema a ser enfrentado é a justificativa da análise do risco diante do fascínio das grandiosas possibilidades inovadoras da nanotecnologia.

A hipótese de solução do problema, fundamentada na teoria sistêmica, será pautada inicialmente na demonstração do paradigma entre as possibilidades e os riscos da nanotecnologia, que, conseqüentemente, devem ser contextualizados objetivando-se a mensuração criteriosa dos riscos ambientais e, a partir destes, construir os apontamentos necessários para a prevenção e precaução de danos ambientais.

Neste viés, no primeiro título do artigo será apresentada a nanotecnologia, a partir da sua origem, aplicações atuais e perspectivas futuras. Na sequência, diante do conceito de risco na sociedade sistêmica, serão explicitados os riscos da nanotecnologia. E, ao final, a importância da prevenção e precaução e que maneira pode ser empregada no contexto das incertezas científicas que circundam o mundo nanotecnológico.

1. O HISTÓRICO DA NANOTECNOLOGIA, SUAS APLICAÇÕES ATUAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta parte inicial do artigo destina-se a conceituar a tecnologia denominada nanotecnologia, bem como realinhar a sua origem a partir dos principais cientistas que se dedicaram ao seu desenvolvimento. Por consequência, pretende-se demonstrar as aplicações práticas do nanomundo que já estão sendo comercializadas e as perspectivas futuras que ainda estão em pesquisa, mas que já corroboram o fascínio por esta tecnologia revolucionária.

A nanotecnologia pode ser compreendida primeiramente pela aceção da palavra: o prefixo "nano" vem do grego "nânos", que significa anão, muito pequeno (UFRJ). Assim, a "área do conhecimento que estuda os princípios fundamentais de moléculas e estruturas, nas quais pelo menos uma das dimensões está compreendida entre cerca de 1 e 100 nanômetros é a nanotecnologia. O nanômetro, representado pela abreviação "nm" é a bilionésima parte do metro, ou seja: 10^{-9} do metro. Também pode ser explicado dividindo o número 1/1.000.000.000, ou, 0,000000001m, ou que o nanômetro é nove ordens de grandeza menor que o metro. Logo, a nanotecnologia é a aplicação destas nanoestruturas em dispositivos nanoescalares utilizáveis" (ALVES, 2004, p. 30-31).

Importa esclarecer que a nanotecnologia, apesar de estar sendo exponencialmente desenvolvida neste século, não é uma tecnologia nova. Os nanomateriais podem ser produzidos intencionalmente ou disponíveis na natureza, por isso são definidos como: (i) *natural*: nanotecnologia decorrente da evolução natural dos materiais presentes na natureza; (ii) *incidental*: oriundo de algum processo antropogênico, mas não intencionalmente para a produção de nanopartículas, como a poluição de veículos e a fumaça gerada na produção industrial; (iii) *nano-*

material fabricado (ou engenheirado): aquele que é produzido intencionalmente pela ação humana (ENGELMANN; HOHENDORFF; FROHLICH, 2015, p. 21).

À exemplo da nanotecnologia presente na natureza, a lótus, planta sagrada do Egito antigo, de folha verde brilhante foi estudada por uma equipe de pesquisadores do laboratório da General Motors, em Michigan (EUA). Este estudo foi motivado pela capacidade das folhas de repelir as gotículas de água que rolam sobre as folhas e carregam consigo a poeira. Os cientistas constataram que a propriedade hidrofóbica autolimpante da folha decorre da rugosidade micrométrica da superfície, aos pelos manométricos e a composição química da superfície que se aproxima muito da cera. A compreensão da nanotecnologia "natural" existente na planta tem sido fonte de inspiração para os pesquisadores aplicarem em pinturas de telhados, vidros e até mesmo em tecidos auto-limpantes (MALDANER).

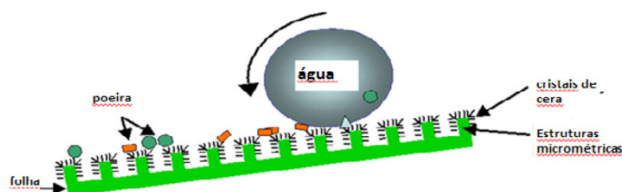


Figura 1: Esquema representativo do mecanismo de hidrofobicidade da Folha de Lótus.

Fonte: Maldaner

O azul das asas das borboletas também contém nanotecnologia, pois é consequência da interferência construtiva da luz na estrutura ordenada das asas, em escala micro e nanométrica. Assim também ocorre com as lagartixas, pois a possibilidade de caminharem pelas paredes se deve à nanotecnologia. As patas são revestidas de pelos finíssimos, tão adaptáveis que podem aproximar-se a poucos nanômetros de uma base de apoio, sobre grandes extensões.

Maldaner explica que “as interações entre a base de apoio e os pelos são do tipo ‘ligação Van-der-Waals’, bastante fracas na verdade, mas concretizada através de milhões de pontos de aderência tornam-se suficientemente fortes, o que permite que o animal fica retido na superfície”. Esta nanotecnologia vista nas lagartixas tem sido estudada para aplicação em adesivos (MALDANER).

O mexilhão também contém nanotecnologia de aderência, conforme explica Maldaner:

Quando quer colar-se a uma rocha ou outro apoio qualquer, abre as valvas, estica o pé até tocar no apoio, arqueia-o em ventosa e, através de pequenas cânulas, lança sobre o apoio, na zona de baixa pressão, um fluxo de pequenas esferas de agente colante, as micas. Forma-se assim, de imediato, uma pequena almofada de espuma, com forte aderência subaquática. É a este amortecedor que o mexilhão se prende, com filamentos elásticos de seda marinha, de modo que nem o mar mais agitado consegue arrancá-lo (NANO.GOV).

Sobre a segunda classificação, “incidental”, na antiguidade, os Romanos no Século IV já produziam artefatos, como jarros de vidros (LYCURGUS) com inclusão de partículas coloidais de ouro e prata no vidro, apresentando uma coloração verde na incidência da luz externa, e na cor vermelha na iluminação no ambiente interno do jarro (NANO.GOV).



Figura 2: A Copa Lycurgus no Museu Britânico, iluminada do lado de fora (esquerda) e do lado de dentro (direita).

Fonte: Nano.gov National Nanotechnology Initiative

Dos séculos IX ao XVII, esmaltes cerâmicos brilhantes eram utilizados no mundo islâmico contendo prata ou cobre ou outras nanopartículas metálicas. Posteriormente, nos séculos XVIII e XV, os vitrais das Catedrais europeias adquiriram suas cores graças às nanopartículas de cloreto de ouro e outros óxidos e cloretos metálicos, que também atuam como purificadores de ar fotocatalíticos (NANO.GOV).

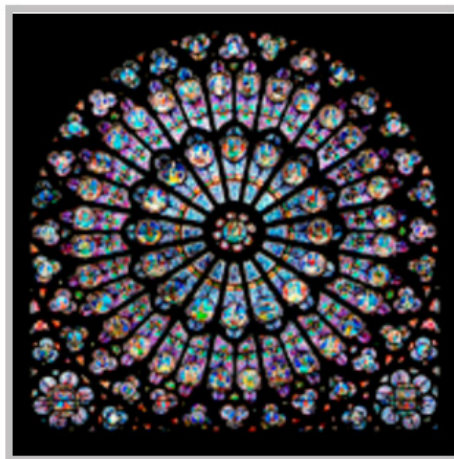


Figura 3: A roseira sul da Catedral de Notre Dame, Paris.

Fonte: Nano.gov

Nos Séculos XIII e XVIII as lâminas de sabão “Damasco” continham nanotubos de carbono e nanofios de cementite (formulação de aço e carbono) que conferiam força, resiliência e capacidade de manter a lâmina afiada (REIBOLD, 2006).

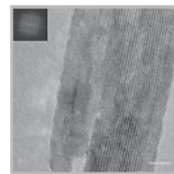


Figura 4: À esquerda o sabre de Damasco (foto de Tina Fineberg para The New York Times) e à direita imagem de microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução de nanotubos de carbono.

Fonte: The New York Times e Nature

Iniciando a abordagem a respeito da nanomaterial fabricado, importante compreender a origem da atual tecnologia, a partir dos descobrimentos históricos que datam desde 1857. É sabido que a nanotecnologia só se tornou realidade em razão das descobertas químicas anteriores e decorrentes das estruturas formantes dos átomos (o que não pode ser dividido). No século V a.C. (500 a.C.) Leucipo, juntamente com Demócrito, (370 a.C.), defenderam a teoria do Atomismo, com a ideia inicial de indivisão do átomo o qual seria composto por particular em interação e movimento. Assim, a teoria defendia que os átomos não se fundem nem se dividem, mas se associam e dissociam de outras matérias (PUC-RJ).

A partir dos descobrimentos iniciados no atomismo é que foi possível a abordagem da nanotecnologia. Diante disso, elaborou-se um quadro das descobertas no tempo e que possibilitaram o atual crescimento da tecnologia.

Tabela 1: Realinhamento histórico dos principais marcos da nanotecnologia.

1857: Michael Faraday descobriu o ouro "rubi" coloidal, demonstrando que o ouro nanoestruturado sob iluminação distinta produz diferentes cores.
1936: Erwin Müller, trabalhando no Siemens Research Laboratory, inventou o microscópio de emissão de campo, permitindo verificar imagens de materiais de resolução quase atômicas.
1947: John Bardeen, William Shockley e Walter Brattain na Bell Labs descobriram o transistor de semicondutores e o conhecimento científico amplamente expandido de interfaces de semicondutores, lançando as bases para dispositivos eletrônicos e a Idade da Informação.
1950: Victor La Mer e Robert Dinigar desenvolveram a teoria e um processo para o crescimento de materiais coloidais monodispersos.
1951: Erwin Müller foi pioneiro no microscópio de íons de campo que possibilitou a imagem da disposição dos átomos na superfície de uma ponta de metal afiada.

1956: Arthur von Hippel introduziu muitos conceitos - e cunhou o termo - "engenharia molecular", como aplicado a dielétricos, ferroelétricos e piezoelétricos.
1958: Jack Kilby projetou e construiu o primeiro circuito integrado, pelo qual recebeu o Prêmio Nobel em 2000.
1959: Richard Feynman, realizou a primeira palestra sobre tecnologia e engenharia na escala atômica, mencionando que "Há muito espaço lá no fundo" ("There's Plenty of Room at the Bottom"). Sugeriu pensar em uma escala muito pequena na qual seria possível colocar o texto da Enciclopédia Britânica na cabeça de um alfinete.
1965: Gordon Moore descreveu na revista Electronics várias tendências que ele prevê no campo da eletrônica. Uma tendência agora conhecida como "Lei de Moore" descreveu a densidade de transistores em um chip integrado.
1974: Norio Taniguchi, Professor de Universidade de Ciência de Tóquio, cunhou o termo nanotecnologia para descrever a usinagem de precisão de materiais dentro das tolerâncias dimensionais de escala atômica.
1981: Gerd Binnig e Heinrich Rohrer no laboratório de Zurique da IBM inventaram Microscópio de tunelamento de varredura (STM), permitindo que os cientistas "vejam" átomos individuais pela primeira vez. Binnig e Rohrer ganharam o Prêmio Nobel em 1986.
1981: Alexei Ekimov, da Rússia, descobriu pontos quânticos nanocristalinos, semicondutores em uma matriz de vidro e realizou estudos pioneiros de suas propriedades eletrônicas e ópticas.
1985: Harold Kroto, Sean O'Brien, Robert Curl e Richard Smalley descobriram o Buckminsterfullerene (C ₆₀), mais conhecido como o buckyball, que é uma molécula parecida com uma bola de futebol em forma e composta inteiramente de carbono, como é o grafite e o diamante. A equipe recebeu o Prêmio Nobel de Química de 1996.
1985: Louis Brus descobriu nanocristais de semicondutores coloidais (pontos quânticos).
1986: Eric Drexler, o primeiro cientista a doutorar-se em nanotecnologia, populariza o conceito de nanotecnologia, através de seu livro "Engines of Creation".
1986: Gerd Binnig, Calvin Quate e Christoph Gerber inventaram o microscópio de força atômica, que tem a capacidade de visualizar, medir e manipular materiais até frações de tamanho nanométrico, incluindo medidas de várias forças intrínsecas aos nanomateriais.

1989: Don Eigler e Erhard Schweizer no IBM Almaden Research Center manipularam 35 átomos individuais de xenônio para explicar o logotipo da IBM. Esta demonstração da capacidade de manipular precisamente os átomos introduziu o uso aplicado da nanotecnologia.

Década de 1990: as primeiras empresas de nanotecnologia começaram a operar - Nanophase Technologies em 1989, Helix Energy Solutions Group em 1990, Zyvex em 1997, Nano-Tex em 1998.

1991: Sumio Iijima da NEC é creditado com a descoberta do nanotubo de carbono (CNT).

1992: CT Kresge e colegas da Mobil Oil descobriram os materiais catalíticos nanoestruturados MCM-41 e MCM-48, agora utilizados na refinação de petróleo bruto, bem como em medicamentos, tratamento de água e outras.

1993: Moungi Bawendi, do MIT, inventou um método para a síntese controlada de nanocristais (pontos quânticos), preparando o caminho para aplicações desde a computação, biologia, energia fotovoltaica até a iluminação de alta eficiência.

1998: O Interagency Working Group on Nanotechnology (IWGN) foi formado no Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia para investigar o estado da arte em nanoescala e prever os possíveis desenvolvimentos futuros.

1999: Wilson Ho e Hyojune Lee sondaram segredos de ligação química montando uma molécula [ferro carbonil $\text{Fe}(\text{CO})_2$] de componentes constituintes [ferro (Fe) e monóxido de carbono (CO)] com um microscópio de tunelamento de varredura. Chad Mirkin na Universidade Northwestern inventou a nanolitografia de imersão levando a "escrita" reproduzível de circuitos eletrônicos, bem como a padrões de biomateriais para pesquisa em biologia celular, nanoencapsulados e outras aplicações. Os produtos de consumo que usam a nanotecnologia começaram a aparecer no mercado, incluindo os para-choques mais leves e que resistem aos arranhões, bolas de golfe que voam mais, raquetes de tênis mais rígidas, meias antibacterianas com nano-prata, protetores solares, roupas resistentes, cosméticos terapêuticos penetrantes, revestimentos de vidro resistentes a arranhões, baterias com recarregamento mais rápido para ferramentas elétricas sem fio, aprimoramentos dos televisores, telefones celulares e câmeras digitais.

2000: o presidente Clinton lançou a Iniciativa Nacional de Nanotecnologia (NNI) para coordenar os esforços federais de P&D e promover a competitividade dos EUA em nanotecnologia.

2001:	Crees Dekker, biofísico holandês, demonstrou que os nanotubos poderiam ser usados como transistores ou outros dispositivos eletrônicos.
2002:	Chad Mirkin, químico da Northwestern University (EUA) desenvolve plataforma, baseada em nanopartículas, para detecção de doenças contagiosas.
2003:	o Congresso aprovou a Lei de Desenvolvimento e Pesquisa em Nanotecnologia do século XXI (PL 108-153). O ato forneceu uma base estatutária para o NNI, programas estabelecidos, responsabilidades da agência atribuídas, níveis de financiamento autorizados e pesquisa promovida para abordar questões-chave.
2003:	Naomi Halas, Jennifer West, Rebekah Drezek e Renata Pasqualin desenvolveram nanoshells de ouro. Quando "sintonizados" de tamanho para absorver a luz do infravermelho próximo, servem de plataforma para descoberta, diagnóstico e tratamento integrados da mama câncer sem biópsias invasivas, cirurgia ou radiação ou quimioterapia destrutivamente sistêmica.
2004:	A Sociedade Real da Grã-Bretanha e a Royal Academy of Engineering publicaram Nanociências e Nanotecnologias: Oportunidades e Incertezas que defendem a necessidade de abordar questões potenciais de saúde, ambientais, sociais, éticas e regulatórias associadas à nanotecnologia.
2004:	SUNY Albany lançou o primeiro programa de educação de nível universitário em nanotecnologia nos Estados Unidos, o College of Nanoscale Science and Engineering.
2005:	Erik Winfree e Paul Rothmund do California Institute of Technology desenvolveram teorias para computação baseada em DNA e " auto-montagem algorítmica ", nas quais os cálculos estão incorporados no processo de crescimento de nanocristal.
2006:	James Tour e colegas da Rice University construíram um carro em nanoescala.
2007:	Angela Belcher e colegas do MIT construíram uma bateria de íons de lítio com um tipo comum de vírus que não é saudável para os seres humanos, usando um processo benigno e econômico.
2008:	foi publicada a primeira estratégia oficial de NNI para Pesquisa Ambiental, Saúde e Segurança (EHS) relacionada à nanotecnologia.
2009-2010:	Nadrian Seeman e colegas da New York University criaram vários dispositivos de montagem robusta a nanoescala tipo DNA.

2010: a IBM usou uma ponta de silício que mede apenas alguns nanômetros para esticar o material e criar um mapa 3D do mundo em nanoescala, com o tamanho de um grão de sal.

2013: Os pesquisadores da Stanford desenvolveram o primeiro computador de nanotubos de carbono.

2014: O NNI divulga o Plano Estratégico 2014 atualizado.

Fonte: Nano.gov e Maldaner

A partir deste realinhamento histórico das descobertas na nanotecnologia, compreende-se a nanotecnologia como a capacidade de manipular átomos e moléculas à tal nível que possibilite construir determinado material átomo a átomo. Com isso, o material elaborado está apto a possuir as características e propriedades convenientes, as quais não são atingíveis em escala macro (MALDANER).

Pyrrhoi e Schramm definem que:

A nanotecnologia é um conjunto formado por saberes, técnicas e práticas que estudam e exploram as novas propriedades dos materiais, quando manipulados em níveis atômicos e moleculares. A possibilidade técnica de organizar e controlar a matéria, desde suas menores dimensões e unidades, pode implicar profundas transformações no processo industrial de produção e ter consequências, moralmente significativas, sobre as inter-relações humanas, a organização da conjuntura social vigente e o próprio fenômeno da vida como um todo (PYRRHOI; SCHARAMM, 2012).

Consequentemente, a nanociência diz respeito aos estudos dos fenômenos e manipulações de materiais em escalas atômica, em que as propriedades diferem significativamente das anteriores macroescalares. Em um comparativo, um nanômetro (nm) é mil milionésimos de um metro. Um único cabelo humano possui 80,000nm de largura, um glóbulo vermelho aproximadamente 7,000 nm de largura e uma molécula de água quase 0.3nm de diâmetro (ROYAL SOCIETY).

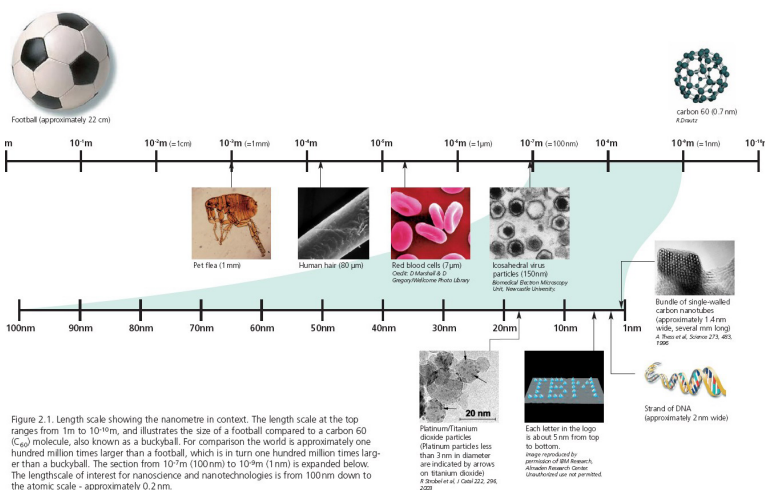


Figura 5: Imagem comparativa para a compreensão da métrica da nanotecnologia.

Fonte: Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties (ROYAL SOCIETY).

Portanto, a nanotecnologia nos últimos 20 anos tem paulatinamente integrado diversos produtos utilizados diariamente no mundo. As perspectivas apontam assim que sua presença será cada vez mais significativa (ROYAL SOCIETY). Esta evolução se deve ao fato de que, nas décadas de 80 e 90 do século passado, um grande esforço de químicos e físicos em todo mundo conduziram ao desenvolvimento de novos materiais e novos métodos de síntese, permitiram a possibilidade de descobertas de novas propriedades e estruturas, que levaram a uma revolução científica e a uma corrida no sentido de compreender e dominar o mundo nano (MALDANER). Diante do fato de tratar-se de uma nova técnica de manipulação dos átomos, as propriedades dos materiais podem ser muito diferentes daqueles em uma escala maior (ROYAL SOCIETY). Muitas soluções já foram desenvolvidas, nas quais se destacam os setores da energia, agropecuária, tratamento e remediação de água, cerâmica

e revestimentos, materiais compostos, plásticos e polímeros, cosméticos, aeroespacial, naval e automotivo, siderurgia, odontológico, têxtil, cimento e concreto, microeletrônica, diagnóstico e prevenção de doenças e sistemas de direcionamento de medicamentos (ENGELMANN, 2012).

Neste sentido, as aplicações de materiais de nanoescala incluem revestimentos muito finos utilizados em eletrônicos, superfícies ativas (janelas autolimpantes), em cosméticos, algumas medidas de remediação ambiental, aplicações na produção de componentes para a tecnologia da informação e comunicação, setor automotivo e aeroespacial (ROYAL SOCIETY).

As perspectivas científicas são de que os nanomateriais fornecerão formas de melhorar o desempenho em uma série de produtos, incluindo eletrônicos à base de silício, *displays*, tintas, baterias, sensores e catalisadores de silício, dentre muitos outros. Também possibilitarão a exploração dos nanotubos de carbono (rolos de carbono com paredes, medindo nanômetros) extremamente fortes e flexíveis que poderão conduzir eletricidade; lubrificantes à base de nanoesferas inorgânicas; materiais magnéticos com nanocristais; nanocerâmica utilizada em próteses médicas duradouras e melhores do que as atuais; componentes automotivos; fornos de alta temperatura; nanoengenharia para purificação mais eficiente da água (ROYAL SOCIETY).

Nos computadores, o armazenamento de dados, utilizando propriedades magnéticas para criar memória, também dependerão da nanociência. Ademais, alternativas baseadas em silício já estão sendo exploradas, como por exemplo, telas de exibição de plástico flexíveis; sensores para detectar produtos químicos no meio ambiente, também para verificar a comestibilidade dos alimentos; monitorar o estado da mecânica dentro dos edifícios; absorção cores para uso em células de energia solar ou rótulos biológicos fluorescentes (ROYAL SOCIETY).

Na bionanotecnologia e nanomedicina as aplicações são especialmente promissoras, como no diagnóstico de doença e sensores para monitoramento da saúde humana; maior eficiência dos medicamentos direcionados aos locais específicos no corpo humano; prata nanocristalina conhecida por ter propriedades antimicrobianas já está sendo usada em curativos para feridas nos Estados Unidos. As aplicações industriais são principalmente nas áreas de determinação das propriedades dos materiais, produção de produtos químicos, fabricação de precisão e computação. Em telefones celulares, por exemplo, materiais envolvendo nanotecnologias estão sendo desenvolvidas para uso em baterias (ROYAL SOCIETY).

Olivier Martin, do Laboratório de Nanophotônica e Metrologia no EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne), desenvolveu um método de medição óptico *in vivo* que permite determinar os riscos ambientais causados por nanopartículas. No teste é possível determinar - em tempo real - a extensão do estresse oxidativo com a qual vive o organismo aquático quando entra em contato com substâncias tóxicas, tais como nanopartículas. Também possibilita descobrir se os organismos se recuperaram após a exposição. O método de medição não é invasivo e pode identificar potenciais efeitos negativos de nanopartículas sintéticas em micro-organismos em vários ambientes naturais, tais como rios e lagos (NRP 64).

A agricultura almeja o desenvolvimento nanotecnológico na elaboração de fertilizantes mais efetivos, pesticidas mais estáveis e mais ecológicos – ou seja, que atinjam o alvo e não todo o meio ambiente. Assim, a dose do pesticida poderia ser significativamente menor, pois menos material evaporaria ou seria absorvido por organismos não desejáveis. Nos EUA, algumas aplicações já foram aprovados e estão sendo comercializadas (NRP 64).

A longo prazo, muitas áreas sofrerão a influência da nanotecnologia, mas haverá desafios significa-

tivos na ampliação da produção em laboratório de pesquisa para a futura fabricação em massa. O esperado é que nanotecnologia permita abordagens mais eficientes, com multifunções em materiais mais econômicos e com a redução do uso de recursos naturais e ao final de emissão de resíduos. Neste sentido, os benefícios ambientais prováveis devem conter a avaliação de todo o ciclo de vida de um produto com nanomaterial, desde a sua fabricação, seu uso e disposição final (ROYAL SOCIETY).

Assim, pode-se concluir que a nanotecnologia está presente no meio ambiente, mas também pode ser alvo de manipulação implicando em diversos benefícios, pois permite fabricar materiais a partir de átomos e assim resultar em propriedades convenientes. Para tanto, a nanotecnologia tem se demonstrado como um meio de revolução tecnológica, um verdadeiro fascínio diante das soluções possíveis. Ao mesmo tempo, o lado inverso também tem importado em discussões complexas a fim de compreender os riscos de resultados negativos implicados e concomitantemente manter o desenvolvimento nanotecnológico.

2. RISCOS AMBIENTAIS DECORRENTES DA NANOTECNOLOGIA

Como verificado, existem muitos produtos que contêm a tecnologia nano que já estão no mercado. Aproximadamente 2.000 (dois mil) produtos que incorporam a nanotecnologia já estão sendo comercializados (SHEARER). Este número pode ser ainda maior, tendo em conta que a nanotecnologia ainda não possui regulamentação em nível internacional e também nacional.

Atualmente, a fabricação e a pesquisa em laboratório funcionam sem orientação de segurança adequada ou medidas de proteção. Ao mesmo tempo, os consumidores estão sendo, involuntariamente, expostos a ingredientes nanomateriais, pois não são

identificados nos rótulos os riscos potenciais. Também estão sendo descartados nanomateriais no meio ambiente, mesmo quando desconhecidos os impactos ou danos que poderão causar. Os governos e a indústria da nanotecnologia oferecem poucas oportunidades para a participação pública, a qual seria essencial para informar a população e inteirá-la das discussões e decisões sobre “como” e “se” deve-se prosseguir com a “nanomundo” (ICTA).

Diante disso, o que chama a atenção da “academia” é que, em menos de uma década, a nanotecnologia desenvolveu-se exponencialmente, mesmo tendo em conta a obscuridade das suas propriedades no estreito campo científico, econômico e público (ABBOT, 2009). Ao mesmo tempo, a preocupação dos riscos da nanotecnologia é severa, haja vista que, em escala nano, os efeitos ambientais dos materiais podem ser diferentes, seja em razão dos nanomateriais possuírem uma área superficial relativamente maior quando comparada à massa de material produzido em escala tradicional, seja pela possibilidade de torná-los quimicamente reativos quando na forma macro são inertes. Além disso, os efeitos quânticos podem dominar o comportamento da matéria no nanoescala afetando a comportamento óptico, elétrico e magnético dos materiais (ROYAL SOCIETY). Este efeito pode ser observado com o ouro, material praticamente inerte, todavia, em formato de nanopartículas é altamente reativo (PASCHOALINO; MARCONE; JARDIM, 2010).

Paschoalino, Marcone e Jardim (2010) defendem a discussão sobre os efeitos ambientais da nanotecnologia:

A reflexão a respeito desta questão é bastante pertinente, uma vez que, além das inúmeras perspectivas oriundas do desenvolvimento de uma gama de novos materiais, há o potencial risco de contaminação ambiental dadas as características intrínsecas das nanopartículas, como tamanho, área superficial e a capaci-

dade de aglomeração/dispersão, as quais podem facilitar a translocação destas pelos compartimentos ambientais e ocasionar, de forma acumulativa, danos à cadeia alimentar. Estes aspectos justificam a importância da investigação sobre a disponibilidade, degradabilidade e toxicidade dos nanomateriais.

Inúmeras pesquisas apontam que os nanomateriais, dada a sua dimensão 10^9 , podem ter uma permeabilidade através da pele, mucosas e membranas celulares, causando um efeito tóxico magnificado. Além disso, as nanopartículas, após o contato com o ambiente ou os organismos vivos, podem se revelar em sua forma livre ou aglomerada. Este processo é dinâmico e inicialmente imperceptível e também pode ser acompanhado pela funcionalização da superfície destas por diferentes agrupamentos químicos presentes no meio (PASCHOALINO; MARCONE; JARDIM, 2010).

De acordo com Hohendorff e Engelmann (2015):

Não restam dúvidas de que as novas e diferentes propriedades físicas, químicas e biológicas dos nanomateriais tornam necessária uma avaliação mais específica, aplicada ao caso concreto. O avanço responsável da nanotecnologia, como acontece com qualquer tecnologia emergente, depende de uma capacidade científica confiável para acesso e gerenciamento dos riscos potenciais. A gestão de riscos é o processo de tomada de decisão realizada por gestores de risco em que o resultado da sua avaliação é pesado contra outros dados relevantes, e, se julgado necessário, são selecionadas e implementadas medidas de prevenção ou mitigação.

Vantablack é uma especialidade de revestimento de nanotubos de carbono projetada para uso no espaço com o fim de reduzir a entrada de quantidade de luz dispersa nos instrumentos óticos espaciais.

Neste revestimento, os nanotubos de carbono que o baseiam são muito curtos e muito bem ligados para se comportarem como fibras de amianto do tipo agulha. No entanto, a combinação de inovação, baixa densidade e elevada área superficial, juntamente com a possibilidade de exposição humana a este produto, levantam sérias questões de risco (MAYNARD, 2016).

No mesmo caminho, um estudo realizado pelo *Department of Applied Science and Nanotechnology Center, University of Arkansas* comprovou, por métodos analíticos, que os nanotubos de carbono são capazes de penetrar no revestimento de semente, um processo que pode afetar a germinação das sementes e o crescimento de mudas de tomate (KHODAKOVSKAYA, 2009, p. 3221).

A *U. K. Royal Society* recomendou que “a liberação de nanopartículas e nanotubos no meio ambiente seja evitada” e sugeriu que “as fábricas e os laboratórios de pesquisa encarem as nanopartículas fabricadas e nanotubos como perigosos” a fim de objetivar reduzir ou remover os seus resíduos (ICTA).

Outro estudo sobre os efeitos dos nanomateriais de carbono sobre brânquias de *Cyprinus* peixes carpio (*Cyprinidae*) expostos à radiação ultravioleta demonstrou que os nanomateriais, quando em contato com os órgãos de peixes, como brânquias em uma solução fisiológica salina, podem ser potencialmente prejudiciais a ambientes aquáticos; todavia os mecanismos de toxicidade são muito complexos e até o momento pouco compreendidos (SOCOOWSKI, 2012).

Os nanomateriais à base de carbono também podem se dispensar fortemente nos compostos hidrofóbicos celulares, tais como lipídios, em relação à água, resultando em uma bioconcentração potencialmente significativa, apontam pesquisas. Em uma escala global as nanopartículas também devem ser consideradas, tais como em relação à atmosfera induzindo transformações orgânicas, reações e outras tantas que ainda são desconhecidas (GUZMAN, 2006).

Renata Behra examinou como micro-organismos aquáticos (bactérias, algas, fungos e caracóis minúsculos) lidam com a nanoplata. Ela observou indícios de que as partículas têm um efeito prejudicial sobre a biodiversidade destes micro-organismos, que são vitais para o ecossistema (NRP 64).

Durante o desenvolvimento de um nanomaterial, é provável que este seja produzido sob condições rigorosamente controladas. A partir da movimentação deste material, com as exposições comerciais, este nanomaterial se integra ao produto, às embalagens, sendo transportado e posteriormente armazenado. Nestas circunstâncias, as quantidades de nanomateriais serão significativamente maiores do que as quantidades manipuladas durante a fase de desenvolvimento de material, uma vez que eles podem ser incorporados, por exemplo, num material composto, redesenhados ou reprocessados. Com isso, as propriedades reais ao final serão muito distintas daquelas previstas na sua criação (LEAD, 2014, p. 28-29).

Garner inclusive fundamenta que as transformações ambientais das nanopartículas também irão afetar as suas propriedades físicas e químicas e, assim, seu destino e toxicidade. Os processos de transformação significativos podem incluir: oxidação, reações com fósforo, dentre outras que dependem do ambiente e produto em questão (GARNER, 2014, p. 12).

Além dos riscos já preliminarmente identificados, sua potencialidade danosa pode ser ainda maior, pois os riscos ambientais potenciais permanecem não identificados devido à falta de priorização na pesquisa dos impactos ambientais. Nanomateriais criam dificuldades imensas para a aplicação de regimes de proteção aos recursos ambientais. Ou seja, as agências não possuem ferramentas e mecanismos econômicos para detectar, medir, monitorar, controlar os nanomateriais fabricados, e muito menos os meios para removê-los do ambiente. Na mesma linha, a indústria tem protegido seus dados sobre os poten-

ciais riscos, alegando tratar-se de informações confidenciais do seu negócio (ICTA).

Ademais, as técnicas de avaliações de risco atualmente existentes foram elaboradas sobre riscos não nanotecnológicos, ou seja, sobre riscos de materiais em que os seus efeitos já são conhecidos. Neste sentido, as métricas para aplicação aos nanomateriais são insuficientes (ICTA).

As incertezas significativas associadas com os riscos (eco) toxicológicos dos nanomateriais artificiais constituem desafios para o desenvolvimento dos produtos em direção a maior segurança e benefício possível à sociedade (SUBRAMANIAN, 2015, p. 1). A "nanoecotoxicologia" representa importante foco de discussão acerca dos riscos nanotecnológicos, pois verifica e avalia as reações dos produtos no meio ambiente, haja vista que há paulatino aumento da produção e disponibilização dos nanoprodutos na sociedade e, por fim, quando da não destinação adequada ao meio ambiente poderão ter resultados inesperados, especialmente no contato com atmosfera, água e solo (PASCHOALINO; MARCONE; JARDIM, 2010).

Uma avaliação do ciclo de vida dos nanomateriais - incluindo fabricação, transporte, uso do produto, reciclagem e disposição final dos resíduos - é necessária para verificar a aplicação aos sistemas legais existentes ou a inexistência diante de lacunas legais que demandem nova regulação. Neste ciclo de vida, devem ser avaliados os efeitos sistêmicos ao meio ambiente, à saúde, à segurança de modo geral ambiental, tudo isso deve ocorrer antes da comercialização dos produtos. Uma vez que após a liberação dos nanoprodutos na natureza podem ser esperados impactos ambientais potencialmente prejudiciais, com importante mobilidade e persistência no solo, água e ar, bem como gerar bioacumulação e interações imprevistas com outras substâncias químicas materiais biológicos (ICTA).

Peter Gehr, nesta mesma linha, menciona que “agora sabemos muito mais sobre os riscos dos nanomateriais e como mantê-los sob controle”. No entanto, precisamos realizar pesquisas adicionais para saber o que acontece quando os seres humanos e o meio ambiente estão expostos a nanopartículas projetadas por longos períodos, ou o que acontece após o período de exposição (LQES).

Nesta via, as nanotecnologias “ao mesmo tempo que abrem perspectivas de melhoria da vida humana, também podem trazer efeitos nefastos”. Técnicas que tinham por objetivo a melhoria produziram efeitos negativos. Essa possibilidade de efeitos são “riscos” que podem tanto declinar para o resultado positivo quanto negativo. Weyermüller, Silva e Schilling corroboram neste sentido que na “Revolução das Nanotecnologias” tem-se a perspectiva de profundas mudanças na sociedade, mas é necessária uma discussão sobre os riscos da inovação” (BARRETTO, 2008, p. 1016).

Desta maneira, as técnicas para quantificação de nanomateriais no ambiente representam um desafio científico. Os nanomateriais, dadas as peculiaridades físico-químicas, exigem o aprimoramento de novas técnicas para verificação e que são distintas das comumente empregadas (PASCHOALINO; MARCONE; JARDIM, 2010). Para tanto, exige-se uma discussão detalhada, qualificada e aprofundada sobre os riscos possíveis da nanotecnologia, a fim de possibilitar o seu desenvolvimento com a máxima redução das expectativas negativas.

Sabe-se que a multidimensionalidade do risco e todos os problemas associados à sua medição impedem que se possa formular qualquer hipótese de teste estatístico conclusivo (ADAMS, 2009, p. 102). Nesta via, falar em risco, mesmo em suas diferentes formulações e locais de observação, refere-se a um estado complexo a ser lidado para se alcançar a precaução dos riscos ambientais. Adam afirma, neste sentido, que o

risco pode ser definido, por aqueles que buscam mensurá-lo, como o produto de uma probabilidade de evento futuro. “O futuro é incerto e inescapavelmente subjetivo: ele não existe a não ser nas mentes das pessoas que tentam prevê-lo” (ADAMS, 2009, p. 64).

Luhmann corrobora a complexidade, mencionando que não existe nenhum ponto de vista objetivo para uma avaliação adequada. De tal modo que a avaliação do risco é sempre diferente após a consumação de um dano. Posteriormente, não se compreende um presente e passado na prudência do risco que antecedeu a uma tomada de decisão por parte de alguém. Neste sentido, o futuro nos mostra outro presente no estado atual de risco que será julgado novamente por uma ótica muito diferente. É o tempo de quem se encarrega de produzir esta diferença na avaliação social do risco, diferença que é indeterminável em seus conteúdos pelos cálculos do presente. Isto é, o risco é o risco de que a avaliação varie com o tempo. Todavia, não se pode olvidar que o cálculo do risco é parte de uma máquina histórica, que arranca de uma determinada situação e que se apegue a esse risco estabelecido (LUHMANN, 1991, p. 165).

Neste sentido, as ocorrências de graves danos ambientais a partir dos nanomateriais são um fenômeno complexo e multifacetado, capaz de atingir inúmeros meios e seres, tendo por consequências grandes danos que estarão sempre interconectados diante do mecanismo complexo de funcionamento da atual sociedade de risco. Todavia, apesar da complexidade de mensuração dos riscos, a rejeição do risco revê-la como a renúncia da oportunidade de precaucionar futuros danos. Logo, o ponto de partida mora inicialmente no conhecimento e valoração dos riscos nanotecnológicos nos efeitos possíveis atuais e futuros.

Em suma, a nanotecnologia possivelmente trará mais eficiência na produção e utilização dos nanomateriais, na indústria automotiva com materiais mais leves e resistentes, na comunicação imprimindo

mais velocidade de transmissão de dados e armazenamento, na química resultando em maior eficiência energética, na farmacêutica com sistemas de difusão de medicamentos que atinjam pontos específicos no corpo humano, no setor de energia com armazenamento e a produção de energia de modo ecológico, também no meio ambiente com materiais que possibilitem retirar os poluentes dos efluentes industriais, bem como em sua defesa na ocorrência de desastres. Portanto, é reconhecível o fascínio que a nanotecnologia demonstra diante das diversas possibilidades de soluções (ALVEZ, 2004, p. 30-31).

Ao mesmo tempo em que a nanotecnologia se revela como uma oportunidade de desenvolvimentos positivos para o futuro da humanidade, o risco assim revela-se como a oportunidade de estabelecer vínculos com o futuro a evitar as consequências negativas. Conexões estas que permitem lançar a consciência às projeções além do hoje, mas do que ainda virá. É sabido que esta conscientização do risco justamente objetiva evitar (prevenir e precaucionar) danos vivenciados no passado, quando as novas descobertas tecnológicas eram implementadas sem qualquer mensuração de risco e os danos nefastos se concretizaram. O pensamento voltado exclusivamente no resultado imediato dos ganhos com a inovação merece ser ligeiramente repensado.

3. A PREVENÇÃO E A PRECAUÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS NANOTECNOLÓGICOS

Diante da possibilidade de efeitos negativos advindos da nanotecnologia, denominados risco, é importante compreender de que forma eles podem ser mensurados e contidos. Ademais, a nanotecnologia tem propriedades que não respeitam os limites territoriais das empresas e nem os espaços geográficos. O risco tem prevalência da questão econômico-em-

presarial na definição da regulação sobre as questões envolvendo o ser humano e o meio ambiente (ENGELMANN; MAFALDO, 2015, p. 87).

Além da possibilidade de propagação, os riscos nanotecnológicos de danos ambientais possuem um caráter agravante: são altamente complexos, não possuem previsibilidade e são abarrotados de incertezas científicas quanto as suas projeções de riscos. Inclusive, mesmo decorridos anos após um dano ambiental, as consequências podem persistir e se propagar. Para tanto, importa compreender o sistema complexo que envolve as medidas preventivas dos riscos implicados nesta nova tecnologia e suas possíveis formas de gestão de risco aos danos ambientais.

Logo, o desafio é de que as ameaças e os riscos sistematicamente coproduzidos sejam evitados, minimizados, dramatizados, canalizados de modo que não comprometam o processo de modernização e nem as futuras gerações. Portanto, o que é sabido é que a gestão ambientalmente sustentável dos nanomateriais deve abordar todo o ciclo de vida do produto, seus possíveis efeitos à saúde e ao meio ambiente. Logo, esta atuação deve ocorrer antes de comercialização (BECK, 2010, p. 24).

Portanto, diante deste cenário, revela-se, de soberana importância, como hipótese de solução dos problemas tecidos neste artigo, a aplicação do princípio da prevenção e precaução, uma vez que estes podem envolver uma gama de procedimentos cautelatórios para minimizar os riscos de danos ambientais atuais e futuros. É preciso ter em mente que o passado deixou de ser uma chave confiável para o futuro, a abordagem da precaução é necessária e requer uma série de mudanças na cultura científica e na forma como a avaliação de risco é realizada, (BECK, 2010, p. 24) uma vez que esta possui um elemento agravante: o desconhecimento científico.

Assim, alguns investigadores, que preferem uma abordagem mais abstrata e generalizada, distri-

buem as incertezas por três categorias: *enviesamento*, *aleatoriedade* e *variabilidade verdadeira*. Outros especialistas categorizam a incerteza em termos da estimação do intervalo de confiança da *probabilidade de ocorrência* e da *gravidade* do impacto do perigo potencial. Por isso, habituados com os fatores de incerteza, utilizam elementos prudenciais como, por exemplo: (i) basear-se em espécies de animais para estabelecer os potenciais efeitos sobre o homem; (ii) utilizar escalas de peso corporal para comparações entre espécies; (iii) adotar um fator de segurança na avaliação de uma dose diária admissível para ter em conta a variabilidade intra e interespecie, o valor deste fator variável em função do grau de incerteza dos dados disponíveis; (iv) não determinar doses diárias admissíveis para as substâncias reconhecidas como genotóxicas cancerígenas; (v) tomar como base o nível "ALARA" (*as low as reasonably achievable* - tão baixo quanto razoavelmente possível) para determinados contaminantes tóxicos (CCE).

Damodaram, apesar da redação, direciona as questões da área da Administração: o autor realiza uma interessante comparação entre a *Gestão de Riscos* e a *Proteção Contra os Riscos* que é muito pertinente aos riscos nanotecnológicos diante dos riscos negativos e as oportunidades positivas (DAMODARAM, 2009, p. 302):

Tabela 2: Gestão de riscos e a proteção contra os riscos.

	Proteção contra riscos	Gestão de riscos
Visão do Risco	O risco é um perigo	O risco é um perigo e uma oportunidade
Objetivo	Proteger contra as consequências negativas do risco	Explorar os aspectos positivos dos riscos gerados pela incerteza
Ênfase funcional	Financeira	Estratégia, abrange todas as funções
Processo	Orientada ao produto. Concentrada no uso de derivados e seguros como proteção contra o risco	Orientada ao processo. Identifica as dimensões-chave do risco e tenta desenvolver maneiras melhores de tirar vantagem desses riscos em relação à concorrência
Medida do sucesso	Redução da volatilidade dos lucros, fluxos de caixa ou valor	Maior valor
Tipo de opção real	Opção de venda (seguro contra maus resultados)	Opção de compra (tira vantagem da alta volatilidade para gerar bons resultados)
Principal efeito sobre o valor	Taxa de desconto menor	Maiores e mais estáveis retornos excedentes ao custo do capital
Possivelmente faz sentido para	Empresas de capital fechado ou controladas por número pequeno de acionistas com expressiva alavancagem e custo de dificuldades financeiras.	Empresas atuantes em setores voláteis e com expressivo potencial para retornos excedentes (se bem-sucedidas)

Fonte: DAMODARAM, 2009, p. 302.

Logo, extrai-se do importante comparativo, que a uma gestão estratégica do risco realiza um olhar mais amplo a respeito dos riscos, ou seja, não só

no sentido de dano, mas de oportunidade. Justamente visando se evitar o engessamento das novas tecnologias e oportunidades de evolução e melhoramento de técnicas disponíveis.

Logo, as incertezas científicas exigem medidas precaucionais urgentes, provisórias e proporcionais com um constante monitoramento da atividade, bem como avaliação periódica das técnicas, das situações de perigo, dos resultados das pesquisas e, assim, tornando próspero o gerenciamento dos riscos (ENGELMANN; FORES; WEYRMÜLLER, 2010, p. 138).

A abordagem preventiva requer obrigatoriedade, mecanismos de supervisão acerca das características únicas dos nanomateriais. Estes mecanismos devem priorizar os riscos para a proteção da saúde pública e do meio ambiente. Além disso, esta supervisão deve ser transparente, fornecendo ao público as informações sobre os processos de tomada de decisão, sobre os testes de segurança dentre outras decisões necessárias. Os desenvolvedores e fabricantes devem se posicionar como administradores responsáveis pela segurança e eficácia dos seus processos e produtos, mantendo a responsabilidade por quaisquer impactos adversos decorrentes deles (ICTA).

Já a precaução, comando necessário diante das incertezas científicas, merece ser evocado. O foco, assim, deve ser voltado a atribuir o ônus da proteção aos responsáveis pelas atividades potencialmente nocivas. Este princípio se releva primordial quando principalmente as pesquisas sugerem que a exposição a pelo menos alguns nanomateriais, nanodispositivos ou produtos da nanobiotecnologia podem causar sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente (ICTA).

A aplicação do princípio da prevenção e precaução diante das incertezas científicas acerca de todos os possíveis efeitos dos nanomateriais necessita aliar-se a combinação do número mais significativo de informações disponíveis atualmente no mundo. Este

instrumento é possível de ser consagrado mediante a realização de estudos transdisciplinares que objetivem identificar os riscos implicados, seja para a fauna e flora marinha ou para os seres humanos.

Damodaram (2009, p. 109) defende que a cautela aos riscos deve iniciar pela sua identificação, quando serão apontadas as possibilidades negativas ou positivas da atividade, a partir da transdisciplinaridade. Assim, a pesquisa poderá fornecer as evidências científicas necessárias a determinar se os riscos são credíveis e suficientes para justificar a implementação de medidas de precaução (MENESTREL). Estes estudos, portanto, devem, a partir do seu perfil de toxicidade dos nanomateriais, realizar avaliações precisas e abrangentes, em vista de gerar uma segurança prévia ao mercado (ICTA).

Center for Technology Assessment's Nanoaction Project defende que "regulamentos sustentados em uma abordagem preventiva são fundamentais para os novos desenvolvimentos tecnológicos" objetivando a realização de estudos para a obtenção de dados acerca dos possíveis impactos da nanotecnologia para a saúde e para o meio ambiente a curto e longo prazo. Ademais, a "falta de dados ou evidências não pode servir de base para uma segurança ilusória" (ICTA).

Portanto, a análise de risco ambiental dos nanomateriais depende principalmente de uma estrutura regulatória, envolvendo a geração de protocolos, os quais devem ser baseados em uma interação transdisciplinar, principalmente entre a química, responsável pela síntese, quantificação e caracterização dos materiais, a biologia e a medicina, na concepção dos ensaios e na interpretação dos resultados a fim de se obter uma avaliação dos riscos do modo mais fidedigno possível. Com o aumento das pesquisas nessa área, que abarquem o monitoramento ambiental de nanopartículas, será possível avaliar o risco de contaminação por estes materiais, através de cálculos pro-

babilísticos. O conhecimento dos riscos que os nanomateriais causam ao ambiente será importante para que a sua produção, comercialização e descarte sejam feitos de forma adequada e sustentável (PASCHOALINO; MARCONE; JARDIM, 2010).

CONCLUSÃO

Resumindo o presente artigo, explanou-se, no primeiro título, o histórico da nanotecnologia, partindo-se da demonstração da presença da nanotecnologia no meio ambiente natural (borboletas, lagartixas, mexilhão) e, de forma incidental, com registros datados desde a antiguidade, (Romanos no Século IV) nos jarros de vidros (LYCURGUS) com inclusão de partículas coloidais de ouro e prata no vidro. A terceira classificação denota a possibilidade de fabricação de nanomateriais com nanotecnologia, foco da abordagem.

Na sequência, realinharam-se os principais eventos que marcaram a evolução da aplicação da nanotecnologia até os conhecimentos recentes e que demarcaram o seu conceito como a capacidade de manipular átomos e moléculas para a construção materiais átomo a átomo. Diante desta evolução, a nanotecnologia torna real a elaboração de materiais com as características e propriedades convenientes ao uso que se destina. Condições estas impraticáveis quando da manipulação de materiais em escala macro.

Desta maneira, o fascínio da nanotecnologia justamente existe em razão das inúmeras possibilidades de inovação, solução, praticidade e tantas outras ainda inimagináveis. Por outro lado, as pesquisas e até mesmo as produções de materiais com nanotecnologia estão em andamento, mas sem uma orientação de segurança adequada ou medidas de proteção a se evitar a concretização dos danos ambientais. Além disso, são percebidos inúmeros incentivos dos governos e indústrias com alvo no desenvolvimento, mas

não na prevenção e precaução dos riscos. Ou seja, pesquisas voltadas para a descoberta dos possíveis efeitos da nanotecnologia no meio ambiente não estão sendo almejadas.

Diante deste cenário, o objetivo inicialmente proposto neste artigo foi alcançado mediante a abordagem da nanotecnologia a partir do seu conceito, histórico, fascínio e riscos ambientais já evidenciados pelas pesquisas. Portanto, o problema foi exposto em razão do paradigma do fascínio aos riscos revelou-se dado o exponencial desenvolvimento da nanotecnologia mesmo tendo em conta a obscuridade das suas propriedades de risco, o que demanda a abordagem sobre as hipóteses de solução mediante a aplicação dos princípios da prevenção e precaução imersos na identificação e avaliação contextualizada dos riscos nanotecnológicos.

Portanto, ao mesmo tempo em que a nanotecnologia é fascinante diante das oportunidades de desenvolvimentos positivos, o risco de ocorrências negativas deve ser objeto de estudos. Estudos estes gerados a partir da interação transdisciplinar que possibilite a identificação e valoração dos riscos implicados nos nanoprodutos e, a partir deste, realizar a prevenção e, ao mesmo tempo, monitorar aqueles ainda incertos (precaução), objetivando-se evitar os danos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, Kenneth; MARCHANT, Gary; SYLVESTER, Douglas. Transnational Regulation of Nanotechnology: Reality or Romanticism? **International Handbook on Regulating Nanotechnologies**. 2009. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=1424697>>. Acesso em: 21 jul. 2017.
- ADAMS, John. **Risco**. Tradução Lenita Rimoli Esteves. São Paulo: Senac, 2009.
- ALVES, Oswaldo. Nanotecnologia, nanociência e nanomateriais: quando a distância entre presente e futuro

não é apenas questão de tempo. **Revista Parcerias Estratégicas. Brasília**, v. 9, n. 18, p. 23-40, 2004. Disponível em: <http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/138>. Acesso em: 5 set. 2017.

BARRETTO, Vicente de Paulo. O “admirável mundo novo” e a teoria da responsabilidade. In: TEPEDINO, Gustavo; FACHIN, Luiz Edson (Coords.). **O Direito e o tempo: embates jurídicos e utopias contemporâneas**. Estudos em homenagem ao Professor Ricardo Pereira Lira. Rio de Janeiro: Renovar, 2008.

BECK, Ulrich. **Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade**. São Paulo: Ed. 34, 2010.

INTERNATIONAL CENTER FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT (ICTA). NANOACTION PROJECT. **Principles for the Oversight of Nanotechnologies and Nanomaterials**. Disponível em: <http://www.icta.org/files/2012/04/080112_ICTA_rev1.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2017.

COMISSÃO DAS COMUNIDADES EUROPÉIAS (CCE). **Comunicação da comissão relativa ao princípio da precaução**, 2000. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2000:0001:FIN:pt:PDF>>. Acesso em: 5 jul. 2017.

DAMODARAM, Aswath. **Gestão estratégica do risco: uma referência para a tomada de decisão de riscos empresariais**. Tradução de Feliz Nonnenmacher. Porto Alegre: Bookmann, 2009.

ENGELMANN, Wilson. O diálogo entre as fontes do direito e a gestão do risco empresarial gerado pelas nanotecnologias: construindo as bases à juridicização do risco. In: STRECK, Lênio Luiz; ROCHA, Leonel Severo; ENGELMANN, Wilson (Orgs.). **Constituição, Sistemas Sociais e Hermenêutica**. Anuário do Programa de Pós-Graduação em Direito da UNISINOS. v. 9. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2012.

ENGELMANN, Wilson; FLORES, André Stringhi; WEYERMÜLLER, André Rafael. **Nanotecnologias, Marcos Regulatórios e Direito Ambiental**. Curitiba: Honoris Causa, 2010.

ENGELMANN, Wilson; HOHENDORFF, Raquel Von; FROHLICH, Afonso Vinício Kirschner. Das nanotecnologias aos na-

- nocosméticos: conhecendo as novidades na escala nanométrica. In: ENGELMANN, Wilson. **Nanocosméticos e o Direito à Informação**. Erechim: Deviant, 2015.
- ENGELMANN, Wilson; MAFALDO, Camila. Nanorregulação: condições e possibilidades para a sua estruturação. In: ENGELMANN, Wilson. **Nanocosméticos e o Direito à Informação**. Erechim: Deviant, 2015.
- ESTADOS UNIDOS. NANO.GOV NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE (NANO.GOV). **Nanotechnology timeline**. Disponível em: <<https://www.nano.gov/timeline>>. Acesso em: 28 ago. 2017.
- GARNER, Kendra L.; KELLER, Arturo A. **Emerging patterns for engineered nanomaterials in the environment: a review of fate and toxicity studies**. 2014. Disponível em: <<http://www.readcube.com/articles/10.1007/s11051-014-2503-2>>. Acesso em: 28 ago. 2017.
- GUZMÁN, Katherine A.; TAYLOR, Margaret R.; BANFIELD, Jillian F. Environmental risks of nanotechnology: National nanotechnology initiative funding. **Environmental Science Technology**. v. 40, p. 1401-1407, 2006. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es0515708>>. Acesso em: 5 set. 2017.
- HOHENDORFF, Raquel von; ENGELMANN Wilson. Iniciando a regulação (não tradicional) para as nanotecnologias: a construção do caminho a partir das possibilidades do framework e da árvore de decisão. XXIV Congresso Nacional do CONPEDI, de 3 a 6 de junho de 2015, Aracaju. In: CELLA, José Renato Gaziero; ROVER, Aires Jose; NASCIMENTO, Valéria Ribas do. (Orgs.). **Anais...** Florianópolis: CONPEDI, 2015. Disponível em: <<https://www.conpedi.org.br/publicacoes/c178h0tg/vwk790q7/7FZqE4NANXQ7yC96.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2017.
- KHODAKOVSKAYA, Mariya et al. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. **Acsnano**. v. 3, n. 10, p. 3221-3227, 2009. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/405e/91420259dc42debfc5e-c718aaf6c28a394c5.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2017.
- LABORATÓRIO DE QUÍMICA DO ESTADO SÓLICO (LQES). **A better understanding of nanomaterials**. Disponível

em: <http://lqes.igmm.unicamp.br/canal_cientifico/lqes_news/lqes_news_cit/lqes_news_2017/lqes_news_novidades_2240.html>. Acesso em: 28 ago. 2017.

LEAD, Jamie R.; VALSAMI-JONES, Eugenia. **Nanoscience and the environment**. v. 7. USA: Elsevier, 2014.

LUHMANN, Niklas. **Soziologie des riskos**: El futuro como riesgo. Berlín: Gruyter, 1991.

MALDANER, Marly Jacobi. O admirável mundo nano: nanociência e nanotecnologia. In: **Revista SLT Caucho**. Disponível em: <<http://www.sltcaucho.org/nanociencia-e-nanotecnologia-marly-jacobi/>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

MAYNARD, Andrew. **Não falamos mais sobre riscos da nanotecnologia, mas isso não significa que eles desapareceram**, 2016. Disponível em: <<http://nanotecnologiasociedade.weebly.com/blog/nao-falamos-mais-sobre-riscos-da-nanotecnologia-mas-isso-nao-significa-que-desapareceram-por-andrew-maynard>> Acesso em: 30 jul. 2017.

MENESTREL, Marc Le; RODE, Julian. Why did business not react with precaution to early warnings? In: **Late lessons from early warnings**: science, precaution, innovation. European Environment Agency, 2013. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2/part-d-costs-justice-and-innovation>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

NATIONAL RESEARCH PROGRAMME (NRP 64). **Opportunities and Risks of Nanomaterials**, 2016 Disponível em: <http://www.nrp64.ch/SiteCollectionDocuments/Final_Brochure_NRP64_E.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2017.

PASCHOALINO, Matheus et al. Os nanomateriais e a questão ambiental. **Quím. nova**, v. 33, n. 2, p. 421-430, 2010. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol33N_o2_421_32-RV09047.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2017.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (PUC-RJ). **Leucipo de Mileto e Demócrito de Abdera**. Disponível em: <http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/linha%20tempo/Leucipo_Democrito/>

pdf_LT/LT_leucipo_e_democrito.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2017

PYRRHOI, Monique; SCHRAMM, Fermin Roland. A moralidade da nanotecnologia. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 11, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2012001100002>. Acesso em: 28 ago. 2017.

REIBOLD, M. et al. C. Carbon nanotubes in an ancient Damascus sabre. **Nature**: international weekly journal of science. v. 444, n. 16, 2006. Disponível em: <<http://www.hefajstos.agh.edu.pl/files/%5B2006%5D%20Carbon%20nanotubes%20in%20an%20ancient%20Damascus%20sabre%20-%20M.%20Reibold.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

SHEARER, Cameron. A guide to the nanotechnology used in the average home. **Nano Werk**, 2016. Disponível em: <<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=43847.php>>. Acesso em: 5 abr. 2017.

SLUIJS, Jeroen van der; TURKENBURG, Wim. Climate change and the precautionary principle. In: FISHER, Elizabeth; JONES, Judith; SCHOMBERG, René Von. **Implementing the precautionary principle**: perspectives and prospects. Massachusetts: Edward Elgar, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Rene_Schomberg/publication/268036760_Implementing_the_Precautionary_Principle_Perspectives_and_Prospects/links/5527b9450cf2779ab78a9a12/Implementing-the-Precautionary-Principle-Perspectives-and-Prospect.pdf>. Acesso em: 5 set. 2017.

SOCOOWSKI, Britto et al. Effects of carbon nanomaterials fullerene C60 and fullerol C60(OH)18–22 on gills of fish *Cyprinus carpio* (Cyprinidae) exposed to ultraviolet radiation. **Aquatic Toxicology**, v. 15, p. 114-115, 2012. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22417764>>. Acesso em: 24 jul. 2017.

SUBRAMANIAN, Vrishali et al. Sustainable nanotechnology decision support system: bridging risk management, sustainable innovation and risk governance. **J Nanopart Res**, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/299493919_Sustaina>.

ble_nanotechnology_decision_support_system_bridging_risk_management_sustainable_innovation_and_risk_governance>. Acesso em: 24 ago. 2017.

THE NEW YORK TIMES. **Antique Nanotubes**. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2006/11/28/science/28observ.html?mcubz=0>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (ROYAL SOCIETY). **Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties**. Disponível em: <https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2004/9693.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ). **História da Nanotecnologia**. Disponível em: <<http://www.hcte.ufrj.br/downloads/sh/sh1/Artigos/68.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

WEYERMÜLLER, André Rafael; SILVA, Bruno de Lima; SCHILLING, Lucas Medeiros. As nanotecnologias e o papel do Direito frente aos riscos: In: ENGELMANN, Wilson; HUPFFER, Haide Maria (orgs.). **BioNano ética: perspectivas jurídicas**. São Leopoldo: Trajetos editorial, 2017.