

NANOTECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE

Alan Ricardo Antão Bezerra*

Resumo: Este artigo trata da nanotecnologia e meio ambiente com o objetivo de trazer reflexões acerca do desenvolvimento dessa ciência dedicada ao estudo da manipulação da matéria numa escala atômica e seu impacto sobre o meio ambiente e seus efeitos diretos ou não, sobre os seres vivos e sobre as atividades humanas nas suas relações sociais, a partir de um conceito ampliado de meio ambiente.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Meio ambiente. Impactos ambientais. Atividades humanas. Ética.

Sumário: 1. Introdução. 2. Nanotecnologia, meio ambiente e seus conceitos. 2.1 Concepção atual de meio ambiente. 2.2 O que se entende por nanotecnologia. 3. Nanotecnologia e meio ambiente. 4. Considerações finais. Referências.

Nanotechnology and environment

Abstract: This article deals with nanotechnology and the environment with the aim of bringing reflections on the development of this science dedicated to the study of the manipulation of matter on an atomic scale and its impact on the environment and its direct effects or not, on living beings and about human activities in their social relationships, from an expanded concept of the environment.

Keywords: Nanotechnology. Environment. Environmental impacts. Human activities. Ethic.

Summary: 1. Introduction. 2. Nanotechnology, environment and its concepts. 2.1 Current conception of environment. 2.2 What is meant by Nanotechnology. 3. Nanotechnology and environment. 4. Final considerations. References.

* Mestrando no Programa de Mestrado Profissional em Direito da Empresa e dos Negócios da Unisinos. Especialista em Direito Notarial e Registral pela Uniderp. Especialista em Processo Civil pela URCA.

1 Introdução

As Nanotecnologias fazem parte das áreas inovadoras integrantes na denominada Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), que teve início com o aparecimento da tecnologia digital, em meados do século XX, decorrência de uma realidade composta pela cooperação flexível e global entre sistemas de fabricação virtuais e físicos, caracterizada pela “velocidade”, num ritmo exponencial e não linear gerando novas e mais qualificadas tecnologias; pela “amplitude e profundidade”, com mudanças econômico-sociais-individuais paradigmáticas; e pelo “impacto sistêmico” com transformações de sistemas inteiros, a exemplo do que vem acontecendo com as nanotecnologias (ENGELMANN, 2016, p. 38-39).

O desenvolvimento da Nanotecnologia abre um leque de oportunidades e avanços no sentido de trazer melhorias à qualidade de vida e, também, para contribuir com a preservação do meio ambiente. Porém, como acontece em todas as áreas envolvendo tecnologias que utilizam intensamente materiais sintéticos e substâncias químicas, a nanotecnologia traz consigo, e isso é inerente, a potencialidade de riscos ao meio ambiente e à saúde humana.

Diante disto, este estudo trata da Nanotecnologia e meio ambiente com o objetivo de refletir sobre a Nanociência e a sua importância para o desenvolvimento humano, qualidade de vida, meio ambiente, em contraponto com os riscos que as inovações nanotecnológicas trazem ao desenvolvimento humano, à qualidade de vida e meio ambiente, levando-se em conta que os benefícios e os riscos são inerentes e o que precisa é justamente encontrar formas de potencializar as contribuições positivas e minimizar os possíveis danos, ainda quanto às pesquisas e criações estão sendo feitas nos laboratórios, antes de entrarem na rede de consumo.

2 Nanotecnologia, meio ambiente e seus conceitos

Visando direcionar o estudo para a uma reflexão sobre a nanotecnologia e seu impacto em relação ao meio ambiente, logo se evidencia a necessidade de apresentar previamente os conceitos de meio ambiente e de nanotecnologia que nortearão a discussão.

2.1 Concepção atual de meio ambiente

Enquanto a ecologia é a ciência da natureza e suas tecnologias, um subtópico da Biologia que se dedica aos estudos das relações entre todos os seres vivos

e o meio onde vivem, tanto nas zonas vegetais quanto nos centros urbano, e das influências recíprocas, o meio ambiente é o objeto do estudo da ecologia; refere-se a todos os fatores que envolvem os seres vivos (físicos, químicos e biológicos), ao ecossistema onde a vida se desenvolve, isto é, o espaço da vida, não sendo possível definir “meio ambiente” sem considerar a posição do ser humano diante da natureza e demais ambientes onde está inserido.

A palavra “ambiente” tem origem latina: *ambiens, entis*: que rodeia. Entre seus significados encontra-se “meio em que vivemos”. Conforme Paulo Affonso Leme Machado, autores portugueses acentuam que a expressão “meio ambiente” não é a mais adequada, entendendo constituir um pleonismo, porque ambiente e meio são sinônimos e “meio” é precisamente aquilo que envolve, ou seja, o ambiente (MACHADO, 2005, p. 70).

Para Aloísio Ely (2990, p. 4), meio ambiente significa “todo o meio exterior ao organismo que afeta o seu integral desenvolvimento”, que, estando em equilíbrio, possibilita o desenvolvimento pleno (biológico, social e psíquico). Nas palavras de Guido Fernando da Silva Soares (2001, p. 298 e 299), “no fundo, o meio ambiente é um conceito que desconhece os fenômenos das fronteiras”, que são realidades “determinadas por critérios históricos e políticos, e que se expressam em definições jurídicas de delimitações dos espaços do Universo, denominadas de fronteiras”, levando em conta que nem os ventos, nem as correntes marítimas respeitam linhas divisórias fixadas pelos critérios humanos em terra ou nos espaços aquáticos ou aéreos, nem mesmo “as aves migratórias ou os habitantes dos mares e oceanos necessitam de passaportes para atravessar fronteiras, as quais foram delimitadas, em função dos seres humanos”.

A definição legal do meio ambiente está no artigo 3º, inciso I, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981,¹ *in verbis*: “artigo 3º: para os fins previstos nesta Lei, entende-se por: I – meio ambiente, o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas; [...]”.

Esta definição demonstra que a intenção do legislador foi de proteger todas as formas de vida. Paulo Affonso Leme Machado (2005, p. 145-150) considera a definição legal ampla e salienta que “ambiente” e “meio” são sinônimos, porque “meio” é precisamente aquilo que envolve o “ambiente”. E cita as seguintes legislações estaduais que, de alguma forma, definem “meio ambiente”.

No mesmo sentido é o pensamento de Celso Antônio Pacheco Fiorillo (2005, p. 19), quando expressa que “verificando a própria terminologia empregada, extraímos que meio ambiente relaciona-se a tudo aquilo que nos circun-

¹ Lei da Política Nacional do Meio Ambiente – LPNMA.

da”, explicando que esse o termo é criticado “porque pleonástico, redundante, em razão de ambiente já trazer em seu termo a ideia de ‘âmbito que circunda’, sendo desnecessária a complementação da palavra ‘meio’”.²

José Rubens Morato Leite (2003, p. 78) verifica que parte da doutrina critica a intenção do legislador em colocar a vida humana, animal e vegetal num mesmo patamar, outros entendem que a definição legal de meio ambiente carece de clareza terminológica em relação ao significado jurídico da expressão. No entanto, entende que, visando a proteção efetiva ao meio ambiente, é preferível uma definição mais ampliada que restrita. De qualquer forma, segue prevalecendo o conceito mais amplo e abrangente.

Na opinião de José Afonso da Silva (2004, p. 20), o conceito de meio ambiente deve ser globalizante, abrangendo “toda a natureza, o artificial e original, bem como os bens correlatos, compreendendo, portanto, o solo, a água, o ar, a flora, as belezas naturais, o patrimônio histórico, artístico, turístico, paisagístico e arquitetônico”, concluindo que “o meio ambiente é assim, a interação do conjunto de elementos naturais, artificiais e culturais que propiciem o desenvolvimento equilibrado da vida em todas as suas formas”.

A intenção do legislador foi de deixar este conceito indeterminado de forma que ficasse ao alcance do intérprete o preenchimento das lacunas, de acordo com as situações concretas que fossem se apresentar aos operadores do direito (LEITE, 2003, p. 91).

Destarte, um dano ambiental afeta o direito de viver em meio ambiente ecologicamente equilibrado, atingindo, também, a fruição desse bem de uso comum de todos (artigo 225, da Constituição Federal de 1988). Os danos ao meio ambiente, que decorrem de práticas reprováveis da coletividade e da sociedade de consumo, cobram destes mesmos entes o preço do caos, mormente em razão da Constituição Federal de 1988 ter recepcionado a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, ter adicionado não só o meio ambiente natural, como o artificial, cultural e do trabalho (sadia qualidade de vida) e ter estabelecido a preservação do meio ambiente como princípio fundamental.

A intenção da Constituinte de 1988 foi estabelecer dois objetos a serem tutelados: “um imediato, que é a qualidade do meio ambiente, e outro mediato, que é a saúde, o bem-estar e a segurança da população, que vêm sintetizando na expressão da qualidade de vida”. Logo, a ideia do dano ambiental está vinculada aos elementos naturais, artificiais e culturais e que, por sua vez, encontram-se atrelados ao conceito de meio ambiente (SILVA, 2004, p. 54).

² Grifos do original.

Nos dizeres de José Rubens Morato Leite (2003, p. 104), “o dano ambiental deve ser compreendido como toda lesão intolerável causada por qualquer ação humana (culposa ou não) ao meio ambiente”, de forma direta, “como macrobem de interesse da coletividade, em uma concepção totalizante” e de modo indireto, “a terceiros, tendo em vista interesses próprios e individualizáveis e que refletem no macrobem”.

Assim, não apenas a agressão à natureza deve ser objeto de reparação, mas também a privação do equilíbrio ecológico, do bem-estar e da qualidade de vida imposta à coletividade.

2.2 O que se entende por nanotecnologia

O desenvolvimento das nanotecnologias representa o que se tem de mais avançado em termos de tecnologia que a criatividade humanidade foi capaz de criar até agora. Entende-se por Nanotecnologia a manipulação da matéria em escala nanométrica, ou seja, uma nanoescala, que é uma unidade de medida nanômetro (nm), equivalente a um bilionésimo de um metro. Dessa forma, amplia a ciência de materiais para alcançar o domínio de partículas e interfaces com dimensões muito pequenas, da ordem de um a cem nanômetros. Essas nanopartículas possuem uma grande área superficial que normalmente exibem propriedades mecânicas, ópticas, magnéticas ou químicas diferentes das partículas e superfícies macroscópicas (QUINA, 2004, p. 1028).

De acordo com Paulo Roberto Martins (2004, p. 1), a Nanotecnologia “é o conjunto de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação que são obtidas graças às especiais propriedades da matéria organizada a partir de estruturas de dimensões nanométricas”. A proposta da Nanotecnologia é reduzir uma molécula ao mesmo tamanho negativo nove vezes para interagir mediante programação com outras moléculas de interesses para transformar as coisas (ENGELMANN; PELLIN, 2017, p. 108).

Hoje em dia a Nanotecnologia já permite a construção de máquinas e equipamentos em nanoescala. Com o auxílio da Nanociência é possível fabricar produtos mais seguros, duráveis, inteligentes e de tamanho minúsculo, bem menores, inclusive, que uma célula humana (SILVA; ADÃO NETO; SILVA; DINLÓLA, 2018, p. 2).

Antes da Nanotecnologia, contudo, entrou em cena a Biotecnologia moderna, impulsionada por uma decisão da Suprema Corte Norte-Americana de 1980, permitindo a patente de um micro-organismo geneticamente modificado (uma bactéria derivada do gênero *pseudomonas*), capaz de quebrar o petróleo

bruto, podendo ser utilizada para tratar derramamentos de petróleo no meio ambiente. Foi um importante passo no sentido do rompimento da barreira das espécies, consolidando a denominada “indústria da vida” e sua comercialização.

Desde então a Biotecnologia, enquanto ciência tecnológica baseada na Biologia, que estuda e desenvolve organismos geneticamente modificados para fins produtivos, passou a ser fortemente usada na Agricultura, na Ciência dos Alimentos e na Medicina. Atualmente, a Convenção sobre Diversidade Biológica da Organização das Nações Unidas, de 1992, vigente desde 1993, define Biotecnologia como “qualquer tecnologia que utilize sistemas biológicos, organismos vivos, ou seus derivados, para fabricar ou modificar produtos ou processos para utilização específica” (artigo 2º, segundo parágrafo).

Todo esse processo de mudanças tecnológicas, que permitiram o desenvolvimento da Biotecnologia, abriu portas à Nanotecnologia, e também foi transformado por ela. Ao trabalhar ao nível atômico, onde a matéria se comporta de forma distinta em comparação às escalas maiores, a Nanotecnologia vem contribuindo para simplificar as diferenças entre setores industriais clássicos e entre o natural e o sintético (MARTINS, 2004, p. 6).

Normalmente, a literatura aponta como ponto inicial da Nanociência a palestra intitulada “Há mais espaços lá embaixo”,³ proferida pelo físico Richard P. Feynman,⁴ em 1959 (FEYNMAN, 2002), quando sugeriu a manipulação individual dos átomos para a construção de novos materiais (SILVA; ADÃO NETO; SILVA; DINLÓLA, 2018, p. 2), uma ideia considerada revolucionária para a época. Tempos depois, em 1981, “foi criado o microscópio de tunelamento, que permitiu obter imagens de átomos em uma superfície”, mas a possibilidade de mover átomos individualmente só foi demonstrada em 1990, “quando pesquisadores americanos escreveram o logotipo IBM ao posicionarem átomos de xenônio sobre uma superfície de níquel” (MARTINS, 2004, p. 1).

Graças a novas ferramentas de pesquisa e aos desenvolvimentos experimentais e teóricos, o domínio científico e tecnológico da escala nanométrica só tem crescido desde então, resultando em novos produtos e processos industriais em um ritmo bastante acelerado. Num piscar de olhos estão surgindo classes in-

³ “A cabeça de um alfinete tem um dezesseis avos de polegada de largura. Se você aumentar seu diâmetro 25 mil vezes, a área da cabeça do alfinete será igual à área de todas as páginas da Enciclopédia Britânica. Assim, tudo o que se precisa fazer é reduzir 25 mil vezes em tamanho todo o texto da Enciclopédia. Isso é possível? O poder de resolução do olho é de cerca de 1/120 de uma polegada – aproximadamente, o diâmetro de um dos pequenos pontos em uma das boas e vetustas edições da Enciclopédia. Isto, quando você diminui em 25 mil vezes, ainda tem 80 angstroms de diâmetro – 32 átomos de largura, em um metal ordinário. Em outras palavras, um daqueles pontos ainda poderá conter em sua área 1.000 átomos. Assim, cada ponto pode ter seu tamanho facilmente ajustado segundo o requerido pela gravação, e não resta dúvida sobre se há espaço suficiente na cabeça de um alfinete para toda a Enciclopédia Britânica” (FEYNMAN, 2002, p. 138).

⁴ Richard P. Feynman recebeu Prêmio Nobel de Física em 1965.

teiramente novas de dispositivos e sistemas micro e nano fabricados. Ao oferecer oportunidades científicas e industriais impensáveis até bem pouco tempo, essa nova situação indica um salto na civilização tecnológica, cuja altura ainda sequer pode ser imaginada (MARTINS, 2004, p. 1).

A meta da Nanotecnologia é combinar as capacidades não biológicas da matéria inorgânica com as capacidades do biomaterial, numa fusão entre materiais vivos e não vivos, que resultem num organismo híbrido, previsível, controlável e que consiga fazer o trabalho das máquinas e, conseqüentemente, que seja comercialmente viável. Isso tudo já está sendo aplicado e o resultado é a reestruturação de toda base produtiva, promovendo uma verdadeira revolução na indústria até então existente, com repercussões que já estão se mostrando ainda maiores do que as proporcionadas pela Informática (MARTINS, 2004, p. 6).

Inegavelmente as nanotecnologias estão oportunizando o desenvolvimento de novos produtos com propriedades, funcionalidades e características diferenciadas e, muitas vezes, muito superiores aos materiais usuais. Também podem ser utilizadas no desenvolvimento de materiais nano compostos, nos mais diversos ramos da economia, e, assim, a nanotecnologia já vem sendo tratada pelos cientistas como “a ciência do futuro, que predominará e fará parte da dependência humana por tecnologia” (ENGELMANN; GOMES, 2019, p. 101).

É com o desenvolvimento da nanociência que a evolução econômica do presente e do futuro, e em todas as áreas de conhecimento e necessidades, está sendo promovida, na expectativa de maximizar o tempo e a riqueza econômica dos detentores da informação, do conhecimento e do poder entre governos, das empresas e universidades e nos âmbitos internos e externos (ENGELMANN; PELLIN, 2017).

Contudo, na escala nanométrica, os átomos apresentam características particulares, ainda pouco conhecidas, especialmente quanto aos seus efeitos no meio ambiente e na saúde humana (MARTINS, 2004, p. 8). Nesse sentido, Wilson Engelmann (2016, p. 39), expõe que a inter-relação entre tecnologias e seres humanos pode produzir impactos ao meio ambiente e em todas as relações que ocorrem nele, “muitos deles desconhecidos, especialmente quanto aos efeitos ao longo prazo”.

Os pesquisadores têm alertado para os riscos já diagnosticados, prováveis ou seguros, do uso de produtos feitos a partir da intervenção de nanotecnologias, em contato com humanos ou com o ecossistema, quanto à possibilidade de envenenamento por nanopartículas, que podem afetar a saúde e o meio ambiente, inclusive levando à morte (ENGELMANN; PELLIN, 2017, p. 108).

3 Nanotecnologia e meio ambiente

Como visto, a Nanotecnologia atua numa escala em que estruturas e sistemas apresentam diferentes propriedades e funções em dimensões nanométricas, extremamente reduzidas, revolucionando a base produtiva, trazendo novas oportunidades e desenvolvimentos em todos os setores relacionados à vida, envolvendo materiais naturais e sintéticos, enfim, mostrando-se capaz de resolver muitos dos problemas humanos.

Por isso é importante ter conhecimento sobre como os materiais, na nanoescala, interagem com o corpo humano e com o meio ambiente, para que “seja possível identificar e caracterizar potenciais exposições, determinar os possíveis impactos na saúde humana, bem como desenvolver métodos apropriados de controle e redução da exposição ao trabalhar com materiais na nanoescala” (ENGELMANN; GOMES, 2019, p. 85).

Na escala nanométrica, “o comportamento físico-químico dos materiais difere do seu similar em escala macro”, e essa característica, quando em “interação com o meio ambiente ou o corpo humano, poderá gerar efeitos adversos – tóxicos – ainda pouco conhecidos”. Esse panorama, contudo, parece que não está sendo levado em conta, haja vista que “o número de produtos produzidos a partir da nanoescala, ou com a inserção de alguma nano partícula na sua composição, tem crescido vertiginosamente no mercado consumidor”, mesmo sem “testes ou conhecimentos conclusivos sobre os riscos que poderão ser gerados pelas nano partículas utilizadas” tanto ao meio ambiente, quanto, especificamente, ao corpo humano (ENGELMANN, 2016, p. 41-42).

Em 2004, o editor da Revista Química Nova recebeu uma carta do químico e pesquisador brasileiro Frank Herbert Quina, um dos diretores do Centro de Pesquisa e Capacitação em Meio Ambiente – CEPEMA, da Universidade de São Paulo – USP, destacando os avanços trazidos pela Nanotecnologia em relação à proteção do meio ambiente, mas também alertando sobre os problemas que podem advir dessa tecnologia e que ainda são desconhecidos.

Segundo Frank Herbert Quina (2004, p. 1028), a Nanotecnologia está trazendo, com perspectivas muito animadoras nesse âmbito, avanços científicos nunca antes imaginados, no sentido de melhorias na qualidade de vida e na preservação do meio ambiente, destacando três principais áreas que, no seu pensar, se beneficiam da Nanotecnologia, a saber:

- a) Prevenção de poluição ou dos danos indiretos ao meio ambiente: com o uso de nanomateriais catalíticos que aumentam a eficiência e a seletividade de processos industriais, permitindo o aproveitamento mais eficiente de matérias primas, com menor consumo de energia e diminuição na produção de re-

- síduos indesejáveis; com o desenvolvimento de sistemas de iluminação de baixo consumo energético; como estratégia alternativa na fabricação de dispositivos microeletrônicos; no aprimoramento do desenvolvimento de *displays*, como monitores, por exemplo, tornando-os mais leves e com maior definição, sem o uso de metais tóxicos na sua fabricação e com menos consumo de energia;
- b) No tratamento ou remediação de poluição: como as monopartículas possuem grande área superficial, são eficientes na absorção de metais e substâncias orgânicas, podendo ser auxiliadas, nesse processo, por nanopartículas específicas, como as magnéticas; as propriedades redox e/ou de semicondutor de nanopartículas podem ser aplicadas na degradação química ou fotoquímica de poluentes orgânicos e usadas em processos de tratamento de efluentes industriais e de águas e solos contaminados; e para o futuro, um exército de nanobots (pequenos robôs capazes de manipular a matéria em nível atômico) pode ser utilizado para descontaminar microscopicamente sítios de derrame de produtos químicos. Já existem projetos para a fabricação de nanobots submarinos microscópicos capazes de detectar e recolher partículas de metais pesados do oceano (CANALTECH, 2016);
- c) Na detecção e monitoramento de poluição: a nanotecnologia permite a fabricação de microssensores, cada vez menores, mais seletivos e mais sensíveis para a detecção e monitoramento de poluentes orgânicos e inorgânicos no meio ambiente. Isso implica diretamente em melhorias no controle de processos industriais; na detecção mais precoce e precisa da existência de problemas de contaminação; no acompanhamento do progresso dos procedimentos de tratamento e remediação de poluentes, em tempo real; no monitoramento mais efetivo dos níveis de poluentes em alimentos e outros produtos de consumo humano; na capacidade técnica de implementar normas ambientais mais rígidas, dentre outros benefícios.

Conforme Paulo Roberto Martins (2004, p. 16), a Nanotecnologia está produzindo impactos diretos na qualidade de vida das pessoas (remédios mais eficazes, por exemplo, com consequências na expectativa de vida e nos direitos dos idosos), mas esse mesmo impacto positivo carrega consigo iniquidades, como o acesso a esses medicamentos. Em relação ao meio ambiente, o estabelecimento de processos produtivos não poluidores indica que a Nanotecnologia é um importante aliado do meio ambiente, porém, do mesmo modo que acontece com os eventos relacionados à Biotecnologia e aos transgênicos, iniciativas de maior controle social sobre o desenvolvimento de novas tecnologias se impõem (MARTINS, 2004, p. 16).

Não restam dúvidas de que as perspectivas em torno das nanotecnologias em relação a melhorias ao meio ambiente e à qualidade de vida são bastante animadoras, porém, não se pode subestimar o potencial para danos ao meio ambiente, à vida e à própria existência humana, pois os benefícios e os perigos da nanotecnologia andam juntos, como os dois lados de uma moeda. Isso não é uma descoberta impressionante, mas algo previsível, levando-se em conta que é de conhecimento geral que qualquer área da tecnologia, que faz uso intensivo de novos materiais e substâncias químicas, sempre carrega consigo riscos ao meio ambiente e à saúde humana.

É nesse sentido a preocupação manifestada por Frank Herbert Quina (2004, p. 1028), quando lembra que “as mesmas características que tornam as nanopartículas interessantes do ponto de vista de aplicação tecnológica, podem ser indesejáveis quando essas são liberadas ao meio ambiente”, ressaltando que “o pequeno tamanho das nanopartículas facilita sua difusão e transporte na atmosfera, em águas e em solos, ao passo que dificulta sua remoção por técnicas usuais de filtração”, podendo, inclusive, facilitar “a entrada e o acúmulo de nanopartículas em células vivas”.

O maior problema é que, apesar de sua utilização cada vez mais ampliada, ainda se sabe muito pouco sobre a biodisponibilidade, a biodegradabilidade e toxicidade dos nanomateriais. Como os nanomateriais possuem grande área superficial, boa resistência mecânica e atividade catalítica, podem concentrar compostos tóxicos e transportá-los ao meio ambiente ou se acumular em toda a cadeia alimentar; absorver biomoléculas e interferir nos processos biológicos; permanecer por longo tempo no meio ambiente por serem resistentes à degradação; e produzir reações químicas indesejáveis ao meio ambiente.

Wilson Engelmann (2016, p. 44-45) traz uma síntese bastante elucidativa sobre o ciclo de vida dos nanomateriais, seus estágios e os riscos decorrentes do processo, explicando que o meio ambiente fica exposto a variações ainda desconhecidas, desde o início até o fim dos nanomateriais (reciclagem, incineração); também os trabalhadores são expostos desde as fases de pesquisa e o desenvolvimento, na produção da matéria-prima, até a produção e manufatura dos produtos disponibilizados para consumo; nesse momento começa a exposição do consumidor, “que também, e muitas vezes, é o próprio trabalhador”.

De acordo com Frank Herbert Quina (2004, p. 1028), o desenvolvimento da nanotecnologia está sendo acompanhado por uma preocupação em relação às suas potencialidades negativas para o meio ambiente (considerando seu conceito ampliado), porém, ainda não se tornou realidade na sistematização de normas e pesquisas capazes de minimizar os riscos. A preocupação existe, mas os investimentos em ciência e pesquisas estão muito mais concentrados no desenvolvimento de novos nanomateriais do que em investigações sobre seus riscos. Os

poucos estudos nesse sentido são pontuais, sem o estabelecimento de uma sistematização ordenada, visando obter os melhores resultados possíveis, que abarque e que imponha o contraponto da análise dos riscos sobre cada novo nanomaterial que está sendo criado, muito antes de liberá-lo para o consumo (QUINA, 2004, p. 1028).

Não se trata de obstar ou impedir os avanços tecnológicos, mas da necessidade de pesquisa interdisciplinar voltada para o estudo de aspectos éticos ou impactos ambientais para verificar o potencial de risco nas tecnologias que estão sendo desenvolvidas nos laboratórios, especialmente naquelas que manipulam nanopartículas, para eliminar ou minimizar esses riscos ao meio ambiente e à saúde, buscando soluções conscientes (QUINA, 2004, p. 1029).

A Nanotecnologia demonstra que a criatividade humana é ilimitada e isso traz consigo incertezas e inseguranças, pois, esse “tudo é possível” não garante a aplicação dos novos conhecimentos e criações para o bem da coletividade. O direito e as questões éticas precisam ser constantemente acionados para permearem o debate entre cientistas, iniciativa privada e a sociedade em geral sobre as reais consequências dessas novas tecnologias para o futuro da humanidade (SILVA; ENGELMANN; HOHENDORF, 2016, p. 210).

É preciso pesquisar e aperfeiçoar os testes de nanotoxicologia para que o consumo dos produtos nanotecnologicamente fabricados possa viabilizar uma vida coletiva mais saudável; fomentar a vontade política e econômica para que esses produtos cheguem a todos, evitando que a ciência acabe incentivando uma nova forma de discriminação; analisar seriamente e com responsabilidade ética os impactos sociais, ambientais, humanos, políticos jurídicos e econômicos, sem a sobreposição de um sobre o outro; equacionar entre as possibilidades e os riscos, para que se possa efetivamente fazer uma avaliação concreta dos seus resultados; e desenvolver marcos regulatórios às nanotecnologias, que garantam a realização de todos esses estudos, para que os produtos nanotecnológicos contribuam para melhorar a vida de todos no Planeta, sem colocar a própria existência humana em risco (SILVA; ENGELMANN; HOHENDORF, 2016, p. 233). O maior desafio lançado pela Nanociência é o enfrentamento dos seus riscos, o que faz emergir questionamentos sobre a ausência de marcos regulatórios (ENGELMANN; GOMES, 2019, p. 87).

De acordo com Wilson Engelman e Claudino Gomes (2019, p. 86), existem três aspectos imediatos e contínuos apontados pelos estudiosos do assunto como de tratamento simultâneo obrigatórios no desenvolvimento de produtos na nanoescala:

- a) Os laboratórios de pesquisa e unidades industriais devem entender as consequências das nanotecnologias para o meio ambiente e à saúde (toxicidade das nanopartículas; mecanismos e rotas de exposição de nanoproductos no ambiente; comportamento das células na presença de nanoestruturas; pre-

- venção de liberação de nanopartículas sintéticas no meio ambiente, dentre outras); desenvolver medidas apropriadas de segurança; e promover melhorias e reforçamento das normas e regulações já existentes sobre meio ambiente;
- b) A padronização da linguagem dos pesquisadores das diferentes disciplinas e setores econômicos, com desenvolvimento de nomenclaturas, normas, padrões e regulações internacionalmente aceitas de modo a apoiar o progresso da ciência, engenharia, tecnologia e novos mercados em nanotecnologias;
 - c) Desenvolvimento de metodologias para análise de risco e governança à gestão de novos produtos e das tecnologias criadas no setor privado e Governo, em razão da potencialidade dos riscos, pois seus efeitos na vida humana e no ecossistema, de maneira geral, são desconhecidos (ENGELMANN; GOMES, 2019, p. 87).

O desenvolvimento tecnológico com a finalidade de implantar nanotecnologias em bens e serviços para promover o ser humano e sua qualidade de vida, esbarra no progresso econômico e na acumulação de capital. Atualmente todos os setores produtivos estão sendo afetados pelas nanotecnologias em alguma medida (ENGELMANN; PELLIN, 2017, p. 109).

Os dados mostram a força com que as empresas têm se desenvolvido a partir da produção científica em Nanotecnologia. Pequenas empresas estão trabalhando com nanomateriais por ser um mercado muito lucrativo e exponencial de receitas. Os profissionais que saem das universidades para os laboratórios de pesquisa também compõem o extrato social dos afortunados em acúmulo de bens intelectuais. As universidades, ao seu turno, na falta de investimento público, adotam a forma aberta de inovação, priorizando parcerias com empresas, o que acaba concentrando a busca pelo desenvolvimento no setor privado. O resultado não poderia ser outro senão a otimização econômica, na acumulação de riquezas dos investidores em nanotecnologias apenas no seu sentido lucrativo, em detrimento ao desenvolvimento humano. Assim, diante da falta de conhecimento nesse sentido e as decorrentes incertezas científicas sobre as interações moleculares e atômicas com as células humanas e o ecossistema, os riscos acabam não sendo pesados nas decisões de negócios (ENGELMANN; PELLIN, 2017, p. 109-111).

Ademais, os poucos dados sobre os riscos da interação entre nanomateriais e o meio ambiente que existem não foram produzidos por pesquisas nacionais. Se ao nível internacional faltam estudos, pesquisas e normatização, nesse particular o Brasil está ainda mais defasado (ENGELMANN; PELLIN, 2017, p. 114).

Portanto, a Nanotecnologia existe neste contexto de desenvolvimento concomitante com outras tecnologias que estão se influenciando mutuamente, levando à construção de áreas de intersecção de conhecimentos e de aplicação que potencializam o já elevado potencial de transformação que cada tecnologia em

si já mostra. Faz-se necessário ressaltar este impacto coletivo no campo social, político e ambiental que está afetando a sociedade e que a Nanotecnologia é parte integrante (MARTINS, 2004, p. 3).

Uma inovação responsável cuida do futuro por meio do manejo coletivo de ciência e inovação no presente. É preciso antecipar as responsabilidades, isso não significa bloquear a criatividade humana ou impedir avanços tecnológicos, mas projetar, inovar, avaliar e assumir os riscos decorrentes. E aqui emerge outra questão: “esse encadeamento de ações deverá ser democraticamente enlaçado”, porque senão apenas os aspectos positivos serão privatizados, enquanto que os riscos, os resultados negativos, os danos e os prejuízos serão socializados. O desafio está no equacionamento desses elementos, e cabe ao Direito essa função, para assegurar o respeito aos Direitos Humanos (saúde, segurança e preservação ambiental) para a permanência da vida viável, saudável e segura no Planeta. Apenas o Direito “por meio do diálogo entre as suas fontes, poderá construir respostas jurídicas apropriadas para dar suporte aos novos direitos e deveres gerados pelas nanotecnologias” (ENGELMANN, 2016, p. 50).

4 Considerações finais

No debate entre a liberdade para a pesquisa e a necessidade de uma regulação imediata, que imponha limites, com base em conceitos éticos e jurídicos, na garantia de direitos e na segurança a própria existência humana, o resultado é um panorama de incertezas. E como a história mostra, tanto no Brasil como no exterior, no duelo entre o poder econômico e o meio ambiente, este último sempre perde. Em eventuais crises econômicas, as primeiras regras a serem relativizadas e flexibilizadas são aquelas que protegem o meio ambiente. Com as nanotecnologias e as imensas possibilidades lucrativas não está sendo diferente, com o agravante de que isso está obstando estudos e pesquisas sobre os efeitos do uso indiscriminado de produção a partir da nanoescala.

É preciso, mais do que nunca, garantir a aplicação prática do princípio da função social da empresa, assegurado pelo artigo 170, da Constituição Federal de 1988, que traz, como princípios que conformam a ordem econômica constitucional, a função social da propriedade, ao lado da defesa do meio ambiente, que significa que a empresa não deve visar apenas o lucro, mas também se preocupar com os reflexos de suas decisões à sociedade. O mercado onde a empresa atua é um espaço público de interação social e coletiva. A cultura da responsabilidade social precisa ser cultivada também pela iniciativa privada. Uma empresa preocupada com a função social que desempenha, realiza a gestão, valores intrínsecos e extrínsecos da inovação como sinônimo de progresso econômico e social, e é nessa cultura que a Nanotecnologia deve ser alocada.

Uma empresa politicamente responsável inclui em seus objetivos a proteção do meio ambiente e da vida e assume uma postura ética diante da sociedade. A Nanotecnologia possui uma infinidade de características que atendem inúmeras necessidades humanas. Os riscos e infortúnios são inerentes à pesquisa científica. Por isso se faz tão necessária a limitação no desenvolvimento de nanomateriais por meio de marcos regulatórios baseados em códigos de ética.

No entanto, quando os critérios de governança empresarial não atendem ao problema em questão, ou seja, quando a parte prática da autorregulação na formação, aspectos econômicos e sociais, não emancipam os indivíduos e nem mesmo os inclui no desenvolvimento e na tomada de decisões, é preciso pensar numa intervenção estatal efetiva, para assegurar uma nanotecnologia democrática e transparente, com normas, leis, regulamentos e fiscalização a fim de coagir as empresas para que promovam o desenvolvimento e maximização da riqueza com justiça social e não apenas visando ao lucro e ao gerenciamento de lesões já manifestadas.

Num contexto de desconhecimentos e incerteza científica, para evitar que os riscos se confirmem e o cálculo das consequências da relação custo-benefício seja pesado demais, se faz urgente adotar, efetivamente, uma política de prevenção. Os avanços nanotecnológicos estão sujeitos às decisões racionais para que funcionem em benefício do ser humano e do meio ambiente, influenciando significativamente o legado as futuras gerações. Os caminhos apontados pela literatura são: investimentos em estudos e pesquisas relacionadas à identificação dos riscos e prevenção dos danos; a abordagem ética que aponta para os deveres e responsabilidades; o reconhecimento dos limites da compreensão científica e da vulnerabilidade da saúde humana e dos ecossistemas; e, levando-se em conta que as decisões de negócios devem ser feitas com responsabilidade, é preciso criar leis, normas e regras claras, com força suficiente de coerção e fiscalização para que sejam cumpridas.

Referências

BRASIL, Constituição (1988). *Constituição Federal de 1988*. Constituição da República Federativa do Brasil, de 5 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 31 maio 2021.

_____. Legislação. *Decreto nº 2.519, de 16 de março de 1998*. Promulga a Convenção sobre Diversidade Biológica, assinada no Rio de Janeiro, em 5 de junho de 1992. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2519.htm>. Acesso em: 31 maio 2021.

_____. Legislação. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981*. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/Leis/L6938.htm>>. Acesso em: 31 maio 2021.

CANALTECH. Nanobots podem ser a solução para limpar os oceanos. In: *Redação Canaltech*, de 21 de abril de 2016. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/robotica/nanobots-podem-ser-a-solucao-para-limpar-os-oceanos-63339/>>. Acesso em: 31 maio 2021.

ELY, Aloísio. *Economia do meio ambiente*. 4. ed. Porto Alegre: FEE, 1990.

ENGELMANN, Wilson. *Novos desafios para o Direito na Era das Nanotecnologias*. Tomo, v. 29, 2016. p. 37-54.

_____; PELLIN, Daniela. R. Construcción NanoÉtica: la emancipación de la administración de la sociedad por gubernamentalidad aplicada. In: *Cadernos de Dereito Actual*, v. 5, 2017, p. 107-121.

_____; GOMES, Claudino. Nanotecnologia e a vulnerabilidade dos trabalhadores em seu ambiente laborativo: os desafios gerados pela in(existência) de normas protetivas trabalhistas. In: *Revista de Direitos Fundamentais nas Relações do Trabalho, Sociais e Empresariais*, v. 4, 2019, p. 83-105.

FEYNMAN, Richard P. Há mais espaços lá embaixo. In: *Parcerias Estratégicas*, Memória, nº 18, ago., 2004, p. 137-155. Texto traduzido por Roberto Belisário e Elizabeth Gigliotti de Sousa. Disponível em: <cer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/636/596>. Acesso em: 31 maio 2021.

FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. *Curso de direito ambiental brasileiro*. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

LEITE, José Rubens Morato. *Dano ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial*. 2. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2003.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. *Direito ambiental brasileiro*. 13. ed. São Paulo: Malheiros, 2005.

MARTINS, Paulo Roberto. Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente no Brasil: perspectivas e desafios. In: *II Encontro Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade*, realizado entre 26 e 29 de maio de 2004. Papers apresentados nos Grupos de Trabalho (GT). GT09: Modernidade, riscos e meio ambiente. Coordenadores Julia S. Guivant (UFSC) e Carlos Machado de Freitas (FIOCRUZ). Indaiatuba, SP: ANPPAS, 30. mai. 2004. Disponível em: <<https://anppas.org.br/ii-encontro-associacao-nacional-de-pos-graduacao-e-pesquisa-em-ambiente-e-sociedade/#16>>. Acesso em: 31 maio 2021.

QUINA, Frank Herbert. Nanotecnologia e o meio ambiente: perspectivas e riscos. In: *Revista Química Nova*, Carta ao Editor, v. 27, n. 6, p. 1.028-1.029. São Paulo: Química Nova, 2004. Disponível em: <quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=4052>. Acesso em: 31 maio 2021.

SILVA, José Afonso da. *Direito urbanístico brasileiro*. 5 ed. São Paulo: Malheiros, 2004.

SILVA, Nulliany C. S.; ADÃO NETO, Minos M.; SILVA, Gabriela C.; DINLÓLA, Isabel C. S. Caracterização de nanopartículas magnéticas para remediação ambiental. In: *Scientia*, v. 7, n. 3, C1-C8. Amazonia, 2018. *Revista on-line*. Disponível em: <<http://www.scientia-amazonia.org>>. Acesso em: 31 maio 2021. ISSN:2238.1910.

SILVA, Tania Elias Magno da; ENGELMANN, Wilson; HOHENDORF, Raquel. *Nanotecnologias e os desafios no campo alimentar: que futuro nos espera?* Tomo, v. 29, 2016, p. 207-235.

SOARES, Guido Fernando Silva. *Direito Internacional do meio ambiente*. São Paulo: Atlas, 2001.

