

Nanociências e nanotecnologia

Marcos A. Pimenta¹, Celso P. Melo²

¹*Departamento de Física/UFMG/Belo Horizonte, MG*
e-mail: mpimenta@fisica.ufmg.br

²*Departamento de Física UFPE*

Os termos nanociências e nanotecnologias se referem, respectivamente, ao estudo e às aplicações tecnológicas de objetos e dispositivos que tenham ao menos uma de suas dimensões físicas menor que, ou da ordem de, algumas dezenas de nanômetros. Nano (do grego: "anão") é um prefixo usado nas ciências para designar uma parte em um bilhão e, assim, um nanômetro (1 nm) corresponde a um bilionésimo de um metro. Parte da dificuldade em lidarmos com os novos conceitos decorrentes do avanço das nanociências e das nanotecnologias se deve à nossa pequena familiaridade com o mundo do muito pequeno, de escala atômica, ou seja, das dimensões nanométricas. Como a distância entre dois átomos vizinhos em uma molécula ou em uma amostra sólida é usualmente da ordem de décimos de nanômetros, um objeto com todas suas dimensões na escala nanométrica (também dita nanoscópica) é constituído por um número relativamente pequeno de átomos; em contraste, deve ser lembrado que um pequeno grão de pó de giz, por exemplo, que é um objeto microscópico (e tem, portanto, dimensões típicas milhares de vezes maiores que um nanômetro), possui um número extremamente elevado (que pode ser estimado em cerca de 10^{15}) de átomos.

Em termos tecnológicos, uma primeira motivação para o desenvolvimento de objetos e artefatos na escala nanométrica está associada à possibilidade de que um número cada vez maior deles venha a ser reunido em dispositivos de dimensões muito pequenas, aumentando assim a compactação e sua capacidade para o processamento de informações. Por exemplo, o tamanho dos transistores e componentes se torna menor a cada nova geração tecnológica, o que permite uma maior performance de novos chips processadores que neles se baseiem; embora de tamanho igual ou menor aos da geração anterior, esses chips podem combinar número muito

maior de componentes ativos em uma única unidade. Ao mesmo tempo, uma redução na escala física levará também a uma economia de energia, já que a potência desperdiçada por um dispositivo é proporcional a seu tamanho.

No entanto, mais que na procura pelo simples benefício direto da redução de tamanho, a grande motivação para o desenvolvimento de objetos e dispositivos nanométricos reside no fato de que novas e incomuns propriedades físicas e químicas - ausentes para o mesmo material quando de tamanho microscópico ou macroscópico - são observadas nessa nova escala. Por exemplo, uma amostra de um material metálico, ou seja, naturalmente condutor de eletricidade, pode se tornar isolante quando em dimensões nanométricas. Um objeto nanométrico pode ser mais duro do que outro que, embora formado do mesmo material, seja de maior tamanho. Por sua vez, a cor de uma partícula de um dado material pode também depender de seu tamanho. Um material magnético pode deixar de se comportar como um ímã ao ser preparado sob forma de amostras nanométricas. Um material relativamente inerte do ponto de vista químico, como o ouro, pode se tornar bastante reativo quando transformado em nanopartículas. Enquanto a nanociência busca entender a razão para essa sutil mudança de comportamento dos materiais, a nanotecnologia busca se aproveitar destas novas propriedades que surgem na escala nanométrica para desenvolver produtos e dispositivos para vários diferentes tipos de aplicações tecnológicas.

Na verdade, a alteração das propriedades de um material ao atingir a escala nanométrica se deve à combinação de dois fatores: enquanto, por um lado, é em objetos com essas dimensões que os efeitos quânticos se manifestam de maneira mais evidente, por outro, se observa que quanto menor for o tamanho da amostra, mais importantes se tornam os efeitos de superfície, pelo aumento da proporção entre sua área e seu volume.

A teoria quântica é um ramo da física que explica, entre outras coisas, o comportamento dos átomos e dos elétrons na matéria. De acordo com ela, os elétrons podem se comportar como ondas, o que se manifesta de forma mais clara quando o material tem dimensões nanométricas. Para amostras com um número pequeno de átomos, o comportamento dos elétrons se assemelha ao observado para as vibrações da corda de um violão, que - como é sabido - só são bem definidas para certos valores de frequências. Esta limitação sobre o movimento dos elétrons, conhecida como confinamento quântico, tem efeito direto sobre diferentes propriedades físicas das amostras nanoscópicas, como, por exemplo, sua cor e sua condutividade elétrica.

O outro aspecto relevante na alteração das propriedades dos nano-objetos diz respeito aos chamados efeitos de superfície, devido ao aumento

da razão entre o número de átomos que estão em sua superfície relativamente a aqueles dispersos por seu volume. Por exemplo, em um cubo formado por mil átomos (ou seja, contendo dez átomos dispostos ao longo de cada um dos lados), seiscentos deles, ou seja, 60% do total, estarão na superfície da amostra. Já em um material macroscópico como um grão de areia, a fração de átomos presentes na superfície é irrisória quando comparada com o número total de átomos da amostra. Ocorre que os átomos da superfície têm um papel diferenciado em relação a aqueles presentes no interior do material, uma vez que podem participar de todas as interações físicas e químicas do material com o meio no qual ele está inserido, como a troca de calor, processos de oxidação, etc. É por essa razão que historicamente os catalisadores - materiais que podem acelerar certas reações químicas entre dois outros compostos devido ao fato de que sua superfície se apresenta como um meio adequado para favorecer a interação inicial entre eles - são normalmente empregados na forma de pequenas partículas dispersas no meio da reação: quanto maior a superfície específica do catalisador, ou seja, sua razão superfície/volume, maior será sua eficiência no processo de catálise.

Assim, as nanotecnologias buscam se aproveitar das novas propriedades que surgem nos materiais quando em escala nanométrica para, através do controle do tamanho e da forma dos nano-objetos, conseguir a preparação de novos dispositivos tecnológicos com finalidades específicas.

Quando se iniciou o interesse nas nanociências e nanotecnologias?

Muito embora o enorme interesse do homem pelo estudo e aplicação tecnológica de objetos na escala nanométrica seja bastante recente, podemos afirmar que a nanotecnologia está presente na natureza há bilhões de anos, desde quando os átomos e moléculas começaram a se organizar em estruturas mais complexas que terminaram por dar origem à vida. Por exemplo, o processo de fotossíntese, pelo qual as folhas transformam a luz do sol em energia bioquímica utilizável pelas plantas, ocorre em células que possuem em seu interior verdadeiras nanomáquinas-verdes, um complexo sistema de centros moleculares ativos presentes em camadas organizadas, que são responsáveis pela absorção da energia luminosa, por seu armazenamento sob forma de energia química e por sua posterior liberação controlada para uso pelo organismo como um todo.

Também, mesmo que de forma empírica, isto é, pela prática e sem o devido entendimento dos processos básicos envolvidos, podemos considerar que o homem pratica a nanotecnologia há milênios. Sabemos hoje

que a tinta nanquim, desenvolvida pelos chineses há mais de 2 mil anos, é constituída de nanopartículas de carvão suspensas em uma solução aquosa. Embora normalmente nanopartículas dissolvidas em um líquido se agreguem, formando micro e macro partículas que tendem a se depositar, se separando do líquido, os chineses antigos descobriram que era possível estabilizar a tinta nanquim pela mistura de uma cola (goma arábica) na solução com pó de carvão e água. Hoje é possível entender que, ao se ligarem à superfície das nanopartículas de carvão, as moléculas de cola impedem sua agregação e, portanto, sua separação do seio do líquido. Da mesma forma, as brilhantes cores dos vitrais das igrejas medievais são o resultado da diferenciada forma de absorção da luz por partículas coloidais de ouro de tamanhos distintos: empiricamente, os artesãos de então perceberam que diferentes manipulações com soluções de ouro levavam à produção de vidros com cores variadas, mesmo sem poderem entender que eram os efeitos de confinamento quântico que ditavam quais cores estariam associadas a que tamanho de partículas de ouro coloidal. Assim, além da multitude de exemplos de nanossistemas biológicos que podem ser identificados na natureza, é também extensa a lista de nanodispositivos empiricamente fabricados pelo homem desde os primórdios da civilização.

No entanto, o interesse explícito pelo estudo e desenvolvimento sistemático de objetos e dispositivos na escala nanométrica é bastante recente e historicamente costuma ter seu marco inicial associado à palestra proferida em 1959 pelo físico americano Richard Feynman, intitulada "Há muito espaço lá em baixo". Nessa palestra, que é hoje considerada o momento definidor das nanociências e nanotecnologia como uma atividade científica, Feynman (que veio a receber o prêmio Nobel de Física em 1965, por suas contribuições ao avanço da teoria quântica) sugeriu que um dia o homem conseguiria manipular objetos de dimensões atômicas e assim construir estruturas de dimensões nanométricas segundo seu livre arbítrio. Essa previsão, porém, só começou a tornar-se realidade no início da década de 80, com o desenvolvimento por físicos europeus dos assim chamados microscópios de varredura por sonda, dentre os quais hoje se incluem o microscópio de tunelamento e o microscópio de força atômica. De uma maneira geral, esses microscópios funcionam pelo mapeamento dos objetos de dimensões atômicas através de uma agulha extremamente afiada, contendo poucos átomos em sua ponta, que de maneira controlada "tateia" a estrutura da amostra sob análise, à semelhança da maneira como um cego explora com seu bastão os objetos ao seu redor. Através do deslocamento extremamente preciso da ponta do microscópio em relação à superfície da amostra que se quer investigar, é possível "visualizar" a natureza e disposição espacial dos átomos que constituem um material, o que permite cons-

truir imagens detalhadas de objetos com dimensões nanométricas. A tecnologia da instrumentação correspondente avançou muito nos últimos 20 anos, e hoje o uso desse tipo de microscópio é bastante difundido, podendo o mesmo ser encontrado em vários diferentes centros de pesquisa no Brasil. Enquanto isso, nesse período foram ainda desenvolvidos microscópios eletrônicos (isto é, que usam feixes de elétrons ao invés de luz) de alta resolução, que também são capazes de visualizar os átomos e detalhes em escala nanométrica de um dado objeto.

Como são obtidos os materiais na escala nanométrica?

Existem dois procedimentos gerais para se obter materiais na escala nanométrica. Uma primeira abordagem, o chamado procedimento "de baixo para cima", consiste em tentar construir o material a partir de seus componentes básicos (ou seja, seus átomos e moléculas), da mesma forma que uma criança monta uma estrutura ao conectar as peças de um Lego. Por outro lado, é também possível fabricar um objeto nanométrico pela eliminação do excesso de material existente em uma amostra maior do material, à semelhança da maneira como um artista trabalha os pequenos detalhes em uma escultura, fazendo lo cuidadoso desbaste do supérfluo ou excedente de um grande bloco de pedra ou madeira. Este procedimento ("de cima para baixo") normalmente se vale das chamadas técnicas de litografia, que correspondem a uma série de etapas de corrosão química seletiva e extremamente precisa para a preparação final do objeto nanométrico a partir de um bloco macroscópico do material.

Em um esquema "de baixo para cima", é possível construir um nano-objeto pela deposição lenta e controlada de átomos sobre uma superfície bastante polida e regular. Muitas vezes, os átomos depositados se organizam espontaneamente, formando estruturas bem definidas de tamanho nanométrico. Isto ocorre, por exemplo, quando átomos de germânio são evaporados sobre uma superfície de silício. Como a distância entre os átomos é diferente nos cristais deste dois materiais, os átomos de germânio se organizam na forma de uma pirâmide, ao invés de simplesmente formar uma camada regular de átomos sobre a superfície do silício. Este é um exemplo do chamado processo de auto-organização, ou auto-agrupamento. É também possível construir objetos nanométricos a partir de reações químicas controladas. Nanopartículas de materiais metálicos, como por exemplo a prata, são obtidas em reações químicas em meios aquosos, nas quais os átomos de prata dissolvidos na solução se juntam para formar agregados de tamanho nanométrico.

Uma importante etapa no desenvolvimento das nanociências e nanotecnologias ocorreu no fim da década de 80, quando pesquisadores da IBM mostraram que um microscópio de varredura por sonda pode ser usado não apenas para visualizar átomos, mas também para manipulá-los, ou seja, mover de forma controlada átomos de uma espécie depositados sobre uma superfície de outro material. Foi assim concretizada a visão de Feynman de construção, átomo a átomo, de objetos nanométricos. Desde então, microscópios desse tipo estão sendo usados para criar diferentes tipos de estruturas nanométricas.

Já no procedimento "de cima para baixo", como vimos, as técnicas de litografia podem ser usadas para a construção de um objeto nanométrico a partir de um bloco maior de material. A primeira etapa desta técnica consiste em cobrir o material a ser trabalhado (silício, por exemplo) com uma fina camada de um polímero-precursor que ao ser em seguida tratado por luz se tornará insolúvel em algumas regiões específicas da amostra, segundo um padrão pré-estabelecido. Usando métodos ópticos, o padrão complementar ao desejado pode ser fielmente projetado na amostra coberta pela resina polimérica sensível à luz (foto-litografia). Desta forma, os menores detalhes registrados na amostra são aproximadamente do tamanho do comprimento da onda da luz utilizada. Detalhes tão pequenos como 100 nm podem ser obtidos usando-se luz ultravioleta (UV). Finalmente, a amostra é cuidadosamente exposta a uma solução ácida que remove o excesso de material polimérico que não foi exposto à luz e, portanto, não foi polimerizado, deixando assim o silício exposto segundo o padrão desejado. Alternativamente, e em situações especiais, a camada polimérica pode ser diretamente retirada pelo uso de um feixe de elétrons (litografia por feixe eletrônico), o que permite obter detalhes com resolução de até 20 nm.

Algumas aplicações de objetos e dispositivos nanométricos

Nanoeletrônica: Os dispositivos eletrônicos atuais (transistores, chips, processadores) são majoritariamente baseados no silício e construídos usando técnicas de litografia. O micro-processador de um computador consiste basicamente de milhões de transistores impressos em um bloco de silício. A cada ano, são aprimoradas as técnicas de foto-litografia, permitindo assim a diminuição do tamanho dos transistores individuais, com conseqüente aumento tanto da capacidade de processamento quanto da frequência de operação do micro-processador. No entanto, uma série de dificuldades técnicas impõe limites ao tamanho mínimo dos transistores que podem vir a ser esculpidos, em escala industrial, em um bloco de silí-

cio. Desta forma, acredita-se que a nanoeletrônica venha a ter por base dispositivos concebidos de forma distinta daqueles da micro-eletrônica baseada no silício. Já foi demonstrada, recentemente, a possibilidade de se construir transistores muito menores do que os atuais baseados no silício, usando-se nanotubos de carbono e moléculas orgânicas.

Os nanotubos de carbono são cilindros formados por átomos de carbono, com diâmetros de aproximadamente 1 nm. Devido a diferenças na forma de confinamento quântico de seus elétrons, esses nanotubos, formados espontaneamente a partir da condensação de vapor de carbono em condições apropriadas, podem ser metálicos ou semicondutores. Existe a possibilidade de que os nanotubos de carbono venham a ocupar um papel dominante na era da nanoeletrônica e, com base neles, já foram desenvolvidos em laboratórios diodos e transistores e, mais recentemente, até mesmo uma porta lógica (isto é, um dispositivo capaz de executar operações lógicas durante o processamento de sinais).

Liberação de medicamentos: É possível construir macro-moléculas nanométricas capazes de, como uma gaiola química, armazenar em seu interior a molécula de uma droga ou o princípio ativo de um medicamento, de modo a que venham a funcionar como vetores capazes do transporte pelo organismo e do controle, seja da taxa de liberação, seja do ambiente fisiológico adequado, para que essa liberação do composto específico ocorra. Por exemplo, uma vez injetadas em um ser humano, essas macro-moléculas liberam lentamente o medicamento em seu interior para a corrente sanguínea, o que possibilita sua presença em um nível mais constante no organismo e elimina as indesejáveis variações significativas na concentração de medicamentos de uso contínuo que sejam diretamente injetados na corrente sanguínea. Da mesma forma, a macro-molécula pode ter sua parte exterior preparada para que sua dissolução, liberando o fármaco, ocorra apenas em tecidos-alvo específicos, minimizando os efeitos colaterais da droga utilizada. Por fim, as dimensões nanométricas das moléculas-gaiola podem levar inclusive à preparação de medicamentos capazes de vencer a barreira das membranas cerebrais, levando ao desenvolvimento de uma nova geração de fármacos específicos para o tratamento de alterações bioquímicas ou de tecidos do cérebro.

Propriedades mecânicas de nanomateriais: As nanociências e as nanotecnologias podem ser usadas para tornar os materiais mais resistentes, fortes e leves. Uma análise mais detalhada revela que tanto os diferentes metais quanto as cerâmicas são constituídos por um ajuntamento estrutural específico de grãos de tamanhos microscópicos e nanoscópicos.

As propriedades mecânicas desses materiais são fortemente dependentes do tamanho e da disposição espacial desses grãos; como regra geral, quanto menor o tamanho dos grãos, mais duro pode ser o material correspondente. O aumento da compreensão da relação estrutura-propriedades resultante do avanço das técnicas de nanociências e a possibilidade de maior controle na preparação de materiais nanoestruturados são fatores de grande otimismo quanto ao advento de novos materiais com melhores e até mesmo insuspeitadas propriedades mecânicas. Em especial, os nanotubos de carbono também se notabilizam por suas propriedades mecânicas especiais, sendo, por exemplo, muito mais resistentes e mais leves do que o aço.

Compósitos de polímeros e nanopartículas cerâmicas e metálicas: Compósitos são misturas homogêneas de dois ou mais tipos de materiais. Uma das principais razões para tentar a mistura de diferentes materiais é que o material resultante pode eventualmente exibir tanto propriedades distintas daquelas que caracterizam cada um de seus componentes, como também uma combinação em certo grau dessas propriedades. Assim, pela adequada combinação de componentes, um compósito pode reunir um conjunto de propriedades convenientes e desejáveis. Em geral, é ainda possível alterar as propriedades mecânicas, elétricas e óticas de polímeros pela incorporação em seu interior de partículas nanométricas cerâmicas, metálicas ou de um outro polímero. Exemplo disso é a recente tendência de se desenvolver uma eletrônica totalmente polimérica, que tenha por base a integração, em um mesmo compósito, de componentes ativos (como transistores e processadores) fabricados em regiões contendo maior concentração de um polímero condutor, com componentes passivos (resistores e capacitores) que se valham das propriedades resistivas da matriz formada por um polímero convencional.

Propriedades óticas dos nanomateriais: Como discutido, a luz emitida por um material depende da organização de seus níveis eletrônicos. Pelo tamanho característico das nanopartículas, seus elétrons ficam confinados em níveis discretos de energia, tendo a separação entre eles uma fina e direta dependência com as dimensões físicas do objeto. Assim, a exemplo do que fora empiricamente praticado pelos vidreiros medievais, é possível controlar a cor da luz emitida por um nano-objeto pela seletiva escolha de seu tamanho. Hoje, com base no conhecimento da estrutura em escala mesoscópica dos materiais, a nanotecnologia busca desenvolver lasers e diodos preparados a partir de materiais semicondutores de tamanho nanométrico, que possam assim emitir luz com frequências bem definidas e apropriadas para diferentes tipos de aplicações.

Propriedades magnéticas dos nanomateriais: As propriedades magnéticas de uma nanopartícula dependem de seu tamanho. Assim, por exemplo, o ferro é um material magnético usado para se fazer ímãs permanentes. No entanto, nanopartículas de ferro de tamanho menor do que 10 nm deixam de se comportar como um ímã. O desenvolvimento de aplicações de materiais magnéticos teve um enorme progresso nos últimos anos devido à possibilidade de fabricação controlada de filmes metálicos extremamente finos, com espessura igual a 1 nm, ou menor. Um dos novos fenômenos mais interessantes, conhecido como magnetoresistência gigante, é observado em amostras contendo multicamadas ultrafinas de materiais magnéticos, intercaladas com filmes metálicos não magnéticos. Como a resistência elétrica de sistemas desse tipo varia enormemente em função do campo magnético neles aplicado, esses materiais já vêm encontrando aplicação em cabeças de leitura e gravação de discos de computadores.

Dois comentários finais

Antes de concluirmos, seria de interesse chamar a atenção do leitor sobre dois debates que no momento são travados sobre o avanço das nanotecnologias: um primeiro, mais interno e por enquanto ainda restrito aos especialistas (mas com certo rebatimento sobre a visão popular do que poderia vir a ser o uso cotidiano dessas tecnologias), e um outro, que começa a envolver a opinião pública, e a ocupar a atenção de grupos ativistas de direitos do cidadão.

Será possível a reprodução do mundo macroscópico em uma escala nanoscópica? Uma visão das nanotecnologias que se faz presente de maneira muito freqüente nos meios de comunicação envolve a construção de nanorrobôs que, sob comando, poderiam ser injetados no corpo humano para executar tarefas como desobstrução e reparo de artérias, nanocirurgias e, até mesmo, tratamentos de microrecuperação óssea e dentária. Eixos e rolamentos moleculares, construídos pelo organizado arranjo espacial de moléculas e polímeros, forneceriam os elementos básicos para a fabricação de tais nanomáquinas, uma abordagem muito difundida para o grande público por Eric Drexler. Em seu livro "Engenhos da Criação", originalmente publicado em 1986, Drexler chega a sugerir a possibilidade de que tais sistemas pudessem chegar a um grau de complexidade que os tornassem auto-replicantes e dotados de inteligência própria. No entanto, nos anos mais recentes, cientistas como Richard Smalley e George Whitesides têm se posicionado de maneira crescentemente cética com relação à visão reducionista de que princípios mecânicos do mundo macroscópico pudessem permanecer dominantes na escala nanoscópica.

Segundo eles, dispositivos que simplesmente fossem a reprodução em escala muito reduzida de máquinas de nosso dia a dia não seriam operacionais no mundo nanométrico e, para a construção de objetos realmente funcionais com dimensões moleculares, o homem teria de aprender com a natureza e, a exemplo dela, seguir as leis da química e física nanoscópicas, assim como reveladas pela operação dos sistemas biológicos.

Quais os riscos das nanotecnologias? A história da humanidade mostra que qualquer novo avanço tecnológico pode eventualmente ser apropriado por alguns grupos em prejuízo dos demais. Por mais inverossímil que pareça à ciência atual, a noção de nanomáquinas replicantes dotadas de livre-arbítrio e que, portanto, possam vir a fugir do controle de seus criadores tem o poder de inquietar o cidadão comum, fato que já foi devidamente explorado pela literatura recente. Por sua vez, na esteira das discussões sobre organismos geneticamente modificados, autoridades da Inglaterra chegaram a sugerir no ano passado uma moratória da pesquisa na área das nanociências e nanotecnologias, enquanto os possíveis riscos delas decorrentes não fossem mais bem avaliados. Muito embora o fato de que por sua distância da realidade do conhecimento atual a idéia de nanorrobôs pertença hoje mais ao domínio da ficção científica que das reais preocupações de pesquisa e desenvolvimento dos cientistas que atuam na área das nanociências e nanotecnologias, não há dúvidas que, como em qualquer área onde o conhecimento sofre uma abrupta ruptura, uma mais cuidadosa avaliação de possíveis efeitos e conseqüências das tecnologias correspondentes precisa começar a fazer parte das preocupações coletivas. A par das enormes possibilidades de desenvolvimento científico e tecnológico oferecidas pelas nanociências e nanotecnologias, nanopartículas podem de fato vir a se difundir de maneira não controlada pelo meio-ambiente, as mesmas moléculas que permitiriam vencer a barreira cerebral transportando medicamentos essenciais poderiam se tornar vetores de patógenos desconhecidos, novas armas poderão ser baseadas nas propriedades especiais dos nanosistemas, etc. A lista é extensa mas, como em qualquer novo ramo do conhecimento, não é pela proibição ou decretação de moratória das pesquisas, e sim pela melhor informação ao público leigo e pelo adequado controle social das atividades científicas, que o enorme potencial das nanociências e nanotecnologias pode ser melhor explorado para o bem da humanidade.

Conclusões

As nanociências e nanotecnologias buscam estudar as propriedades de objetos de tamanho nanométrico e desenvolver seu uso em dispositivos com essas dimensões. Ao lado da simples busca pela miniaturização dos dispositivos, com vistas à economia de espaço e de energia, o principal interesse reside na possível exploração de novos efeitos que ocorrem em escala nanométrica, notadamente pela explícita manifestação de efeitos quânticos e pelo aumento da contribuição relativa dos átomos da superfície desses materiais. O desenvolvimento desta área está intimamente ligado ao progresso instrumental recente, que possibilitou ao homem não apenas a visualização como também a manipulação controlada de átomos individuais. As aplicações possíveis dessas tecnologias representam uma nova fronteira do conhecimento em que os limites entre as disciplinas tradicionais, como física, química e biologia se diluem em uma convergência de modelos, técnicas e interesses comuns. Esta é uma área de desenvolvimento recente, que pelo enorme potencial de impacto científico, tecnológico e econômico, tem merecido especial atenção e financiamento seletivo pelos países desenvolvidos. Se o Brasil não dispõe das centenas de milhões de dólares que as nações líderes investem a cada ano na pesquisa em nanociências e no desenvolvimento de nanotecnologias, ao menos uma concertada política de priorização para o setor poderia em muito alavancar as nossas vantagens específicas, dentre as quais se destaca o fato de já possuímos no momento grupos extremamente qualificados atuando nas áreas de nanociências e nanotecnologias. Este é talvez um momento crucial no planejamento científico de nosso País em que, pela adoção de uma política correta de investimentos consistentes e regulares nesta área, possamos desde agora assegurar a futura presença brasileira em termos competitivos ao lado dos países tecnologicamente líderes.

