Plásticos no ambiente

Plastics in the environment

João Pinto da Costa[1], Armando C. Duarte[2] e Teresa Rocha-Santos[3]*

[1] *Investigador no Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) e Departamento de Química da Universidade de Aveiro*

[2] *Professor Catedrático no Departamento de Química da Universidade de Aveiro*

[3] *Investigadora Principal no Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) e Departamento de Química da Universidade de Aveiro*

[*] *Autor correspondente. Email: aduarte@ua.pt*

RESUMO: O plástico é uma realidade inescapável da sociedade moderna. Pode ser encontrado em praticamente todos os produtos comercializados actualmente, graças à sua utilização num vasto universo de aplicações. Contudo, é esta mesma versatilidade e características altamente desejáveis que levaram à crescente acumulação de plástico no ambiente. Plásticos mais pequenos, denominados micro- e nanoplásticos, são, no entanto, um perigo moderno cujos riscos não ainda totalmente compreendidos. Estas limitações advêm não só do seu destino e comportamento no ambiente, que ainda carecem de investigação, mas também das inerentes restrições tecnológicas e metodológicas que, até ao momento, têm impossibilitado um conhecimento preciso e detalhado dos processos químicos, físicos e biológicos nos quais estes materiais podem participar quando nos diferentes ecossistemas. Consequentemente, é necessária mais investigação e informação que permitam uma melhor compreensão dos impactes destes materiais no ambiente.

Palavras-chave: Plástico; microplásticos; nanoplásticos; ambiente.

ABSTRACT: Plastic is an inescapable reality of modern society. It can be found in almost any and every product used nowadays, owing to its endless range of applications. However, it is this same versatility and desirable characteristics that have led to the exponential accumulation of plastic in the environment. Smaller, and perhaps more pervasive plastics – dubbed micro- and nanoplastics – are a modern hazard that have yet not fully understood risks. These stem not only from their fate and behavior that are still under investigation, but also from the inherent technological and methodological limitations that have, so far, impeded a detailed and precise knowledge of the chemical, physical and biological processes that these materials may become involve in ecosystems. Hence, more information and research in required to better understand the impacts of these materials in the environment.

Keywords: Plastic; microplastics; nanoplastics; environment.

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 40, N.º 1, 11-18, março de 2019.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh40n1-d1

1. PLÁSTICO E MAIS PLÁSTICO

Bem-vindos à Era do Plástico, sem o qual uma sociedade moderna é inconcebível. O termo "plástico" aglomera uma vasta gama de materiais, maioritariamente constituídos por átomos de Carbono (C), Hidrogénio (H), Oxigénio (O), Azoto (N), Enxofre (S) e Cloro (Cl). A IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) define plásticos como um termo genérico, aplicado em casos de "materiais poliméricos que podem conter outras substâncias com vista ao melhoramento do seu desempenho e/ou redução de custos" [1]. Tipicamente de elevado peso molecular, estes materiais exibem características que os tornam altamente versáteis e passíveis de aplicações quase ilimitadas, destacando-se o seu baixo peso, durabilidade, resistência à (bio)degradação, impermeabilidade, reciclabilidade e elevada resistividade eléctrica. Não é, pois, surpreendente que os últimos dados apontem para uma produção anual de plásticos próxima dos 350 milhões de toneladas, dos quais a China, Europa e NAFTA (EUA, México e Canadá) são os três maiores fornecedores mundiais [2]. A nível Europeu, a distribuição da procura de plásticos por setor, ilustrada na Figura 1, evidencia uma tendência observada a nível Mundial, em que a maior percentagem do plástico produzido destina-se a embalagens, ou, dito de outra forma, para descarte instantâneo ou quase imediato [3].

Consequentemente, estes materiais contribuem de forma significativa na geração de lixo e estima-se que entre 5 a 13 milhões de toneladas de plástico sejam depositadas, anualmente, nos oceanos [4], e, mantendo-se ao ritmo atual, foi até sugerido que, em 2050, a massa de plástico nos oceanos possa exceder a massa de peixes [5]. Esta acumulação tem consequências não só para a fauna e o ambiente marinhos, mas tem também impactes económicos e sociais, dada as formas – ainda não totalmente clarificadas – através das quais pode influenciar comportamentos, cadeias alimentares e, em última instância, a saúde humana. Talvez entre os mais publicitados e visíveis efeitos desta acumulação de plástico nos oceanos seja o chamado *Garbage Patch* do Pacífico, ou vórtice de lixo do Pacífico, um aglomerado flutuante de lixo situado entre o Havai e a Califórnia, cobrindo aproximadamente 1.6 milhões km2 e sendo constituído por mais de 80.000 toneladas de plástico [6]. Contudo, e apesar de frequente descrição destas zonas de acumulação de lixo como "ilhas de plástico", a baixa densidade (aproximadamente 4 partículas por metro cúbico) inviabiliza a sua detecção por satélite ou mesmo por avião; não obstante, a presença desta "sopa" de plástico é evidente aquando de uma visualização mais próxima, como evidenciado na Figura 2.

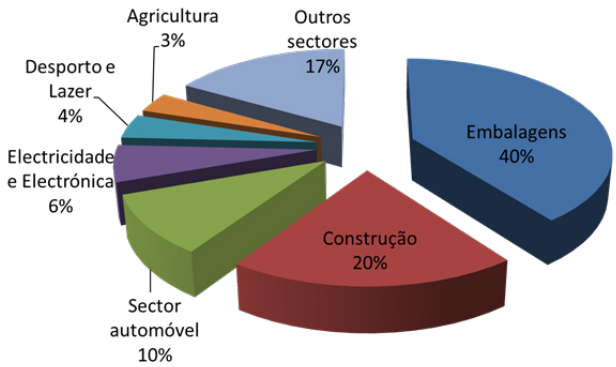

Figura 1. Distribuição da procura de plásticos por segmento de mercado na Europa (EU28+NO+CH). Fonte: PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) e Conversio Market & Strategy GmbH [2].

Figura 2. Em A), uma visão abrangente do vórtice de lixo do Pacífico; em B), pormenor do mesmo, evidenciando a elevada presença de diferentes plásticos. Crédito: Resham Sengar.

2. MICROPLÁSTICOS

Os microplásticos são definidos como plásticos de dimensões < 5mm [7] e, actualmente, estes são classificados como primários ou secundários. Os microplásticos primários incluem partículas intencionalmente produzidas com estas dimensões reduzidas e podem ser encontrados em produtos de higiene e limpeza, como exfoliantes, pastas dentífricas e agentes de limpeza abrasivos. Por outro lado, os microplásticos secundários formam-se no ambiente a partir de fragmentos de maiores dimensões, devido a processos de erosão, abrasão e (bio)degradação [3]. Esta tipologia será, talvez, a que exibe a maior variedade de fontes, incluindo emissões de partículas provenientes da indústria de produção e/ou manutenção de plásticos, nomeadamente, corte, polimento e moldagem, bem como de processos de abrasão, como os observados em pneus. Existe alguma discussão relativamente à tipologia de microfibras libertas aquando a lavagem e secagem de roupa, já que estas, apesar de entrarem nos ecossistemas com dimensões inferiores às estipuladas para sua classificação enquanto microplásticos, resultam do processo de fragmentação de fibras de maiores dimensões, levando alguns autores a classificar estas como microplásticos secundários. Independentemente da sua classificação, a verdade é que se estima que, em cada ciclo de lavagem de roupa, sejam libertas centenas destas pequenas fibras sintéticas para o ambiente, observando-se uma elevada ineficácia na sua remoção de águas pelos actuais processos de tratamento de águas residuais [8]. As fontes de microplásticos, quer primários, quer secundários, são abundantes, estando as mesmas esquematizadas na Figura 3.

3. NANOPLÁSTICOS – O QUE (NÃO) SABEMOS

Apesar do consenso existente quanto à classificação de microplásticos, a definição de nanoplásticos permanece um tópico de debate. Alguns autores baseiam-se na definição etimológica, considerando como nanoplásticos aqueles que apresentam dimensões inferiores a 1 mm [9], sendo que, no último par de anos, se tem verificado uma maior utilização da definição proposta pela União Europeia [10] e que se baseia na classificação utilizada para *engineered nanomaterials*, ou seja, partículas que sejam, em pelo menos duas das suas dimensões, inferiores a 100 nm. Uma outra definição sugere o tamanho limite de 20 mm [11], dado que este é a dimensão a partir da qual estes materiais podem afectar o nanoplankton, que se encontra na base da cadeia alimentar, sendo, pois, de maior relevâncias ecológica e ambiental. É, pois, evidente, que esta discussão não é meramente semântica, dado que a

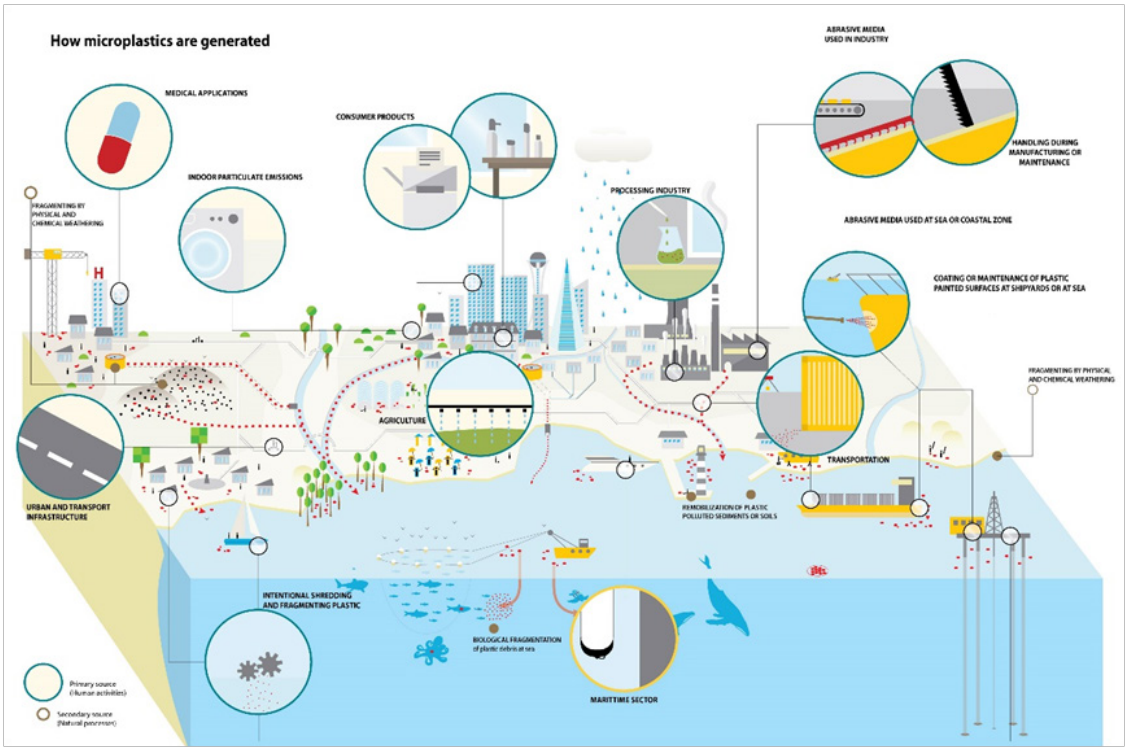

Figura 3. As diferentes fontes de microplásticos, primários e secundários. (Fonte: grida.no/resources/6929. Crédito: Maphoto/Riccardo Pravettoni).

sua definição tem importantes consequências não só do ponto de vista científico, no que concerne à sua análise e caracterização, mas também do ponto de vista regulatório, dadas os diferentes instrumentos, regras e normas a considerar.

A presença de nanoplásticos no ambiente merece pouca contestação por parte da comunidade científica, e, contudo, ainda não existem estudos a demonstrar, de forma irrefutável, a sua presença em quaisquer matrizes ambientais. Não só é expectável a presença de nanoplásticos nos ecossistemas devido a fenómenos idênticos aos que levam à formação de microplásticos secundários, mas sabe-se também que inúmeras actividades, como o corte industrial de espuma de poliestireno [12] ou a impressão 3D [13] levam à libertação de partículas que oscilam entre 11.5 e 220 nm constituindo, pois, nanoplásticos, independentemente da classificação usada.

4. DESTINO DE MICRO- E NANOPLÁSTICOS

A correcta determinação da distribuição de micro- e nanoplásticos no ambiente marinho é inerentemente difícil, devido à complexidade e interconexão das diferentes variáveis envolvidas, nomeadamente, condições atmosféricas, – incluindo variabilidade sazonal e ocorrência de fenómenos como tempestades – correntes, actividades humana e animal, mas também devido às próprias características dos diferentes polímeros, já que estes podem, à partida, apresentar características físicas diferentes entre si, como densidade, e ao seu tamanho. Estima-se que cerca de 80% de todo o plástico encontrado nos mares e oceanos tem como origem fontes terrestres [14] e, apesar de ser expectável que este esteja presente em maior quantidade nas áreas concomitantes à sua origem, alguns estudos de modelação sugerem que, devido aos ventos e correntes marinhas, o lixo marinho, e, mais especificamente, o lixo plástico depositado nos oceanos, pode viajar vastas distâncias, como comprovado pelo modelo "patinho de borracha" [15], demonstrando que a distribuição dos plásticos nos oceanos é, de facto, global, como evidenciado na Figura 4.

Apesar da vasta maioria do plástico descartado ser constituído por polímeros como polipropileno, poliestireno e polietileno, cujas densidades são inferiores à da água salgada, assumindo-se, assim, que uma elevada fracção destes materiais tenderia a flutuar, outros fenómenos contribuem para uma exacerbada complexidade das variáveis a considerar aquando da modelação da distribuição de micro- e nanoplásticos no ambiente marinho. Processos como heteroagregação, em que estas

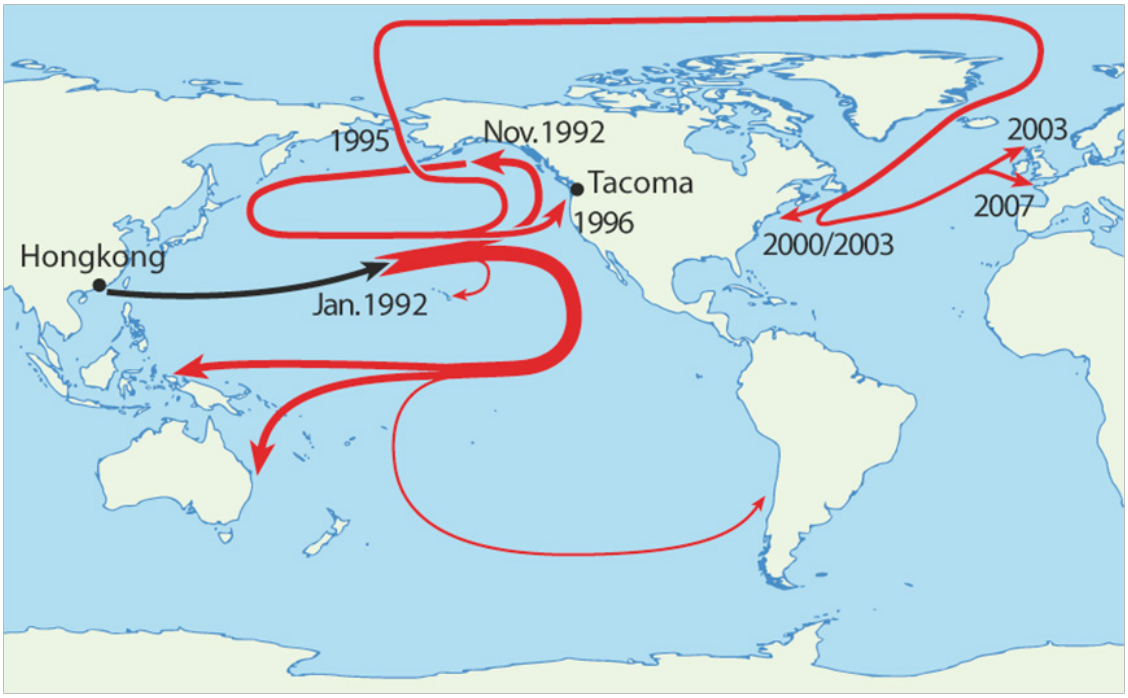

Figura 4. A rota dos "flutuadores amigáveis" [16]. Em Janeiro de 1992, devido a uma tempestade no Oceano Pacífico Norte, um navio de carga perdeu 28.800 animais de borracha, incluindo castores, sapos, tartarugas mas, sobretudo, patos. Esta perda foi utilizada para estudar as correntes oceânicas [17], actuando cada um destes itens como um *drift bottle*, contribuindo de forma significativa para a investigação oceanográfica.

pequenas partículas se agregam a outros detritos, bem como o crescimento de (micro)organismos na superfície destes materiais (*biofouling*) contribuem activamente para uma distribuição destes materiais por toda a coluna de água, dificultando, assim, a modelação da sua distribuição no ambiente marinho. Contrariamente, assim, ao pressuposto intuitivo baseado na acumulação de lixo marinho de maiores dimensões em zonas como o vórtice de lixo do Pacífico (Figura 2), tem sido proposto que a aplicação de técnicas de remoção de microplásticos no oceano pode, de facto, ser mais eficiente se aplicada em zonas específicas, a maior parte das quais localizadas na costa leste asiática [18]. Contudo, tais estudos confirmam que, mesmo nos cenários mais optimistas, continuará a verificar-se um aumento efectivo de micro- e nanoplásticos no ambiente, dada a actual tendência de produção anual destes materiais.

Uma vez no ambiente, os plásticos podem sofrer (bio)degradação, sendo que o processo de biodegradação requer, usualmente, uma iniciação abiótica, que permite a redução da integridade estrutural e propriedades mecânicas, aumentado, assim, a superfície disponível para interacções físicas e químicas, bem como para a colonização microbiana. Entre os tipos de degradação abiótica mais eficazes estão a fotodegradação, mediada pela radiação UV, e a degradação mecânica. De forma sucinta, esta é facilitada pela acção concertada da agitação marítima, erosão e desgaste induzido pelo contacto com rochas, areia e outros detritos. A radiação UV é de particular relevância nos materiais que se encontram à superfície, que resultam em alterações químicas para as quais contribuem, também, as propriedades oxidativas da atmosfera [19]. Em profundidades maiores, estes processos são considerados negligenciáveis, não só devido às baixas temperaturas e à ausência de luz solar, mas também pela baixa densidade das comunidades microbianas existentes [20], levando a que as partículas depositadas a estas profundidades sejam continuamente sujeitas a processos de erosão, dos quais resultam partículas de menores dimensões e, consequentemente, um fonte constante de exposição a estes materiais.

Não obstante os estudos de modelação e experiências descrevendo os putativos mecanismos de (bio)degradação dos plásticos no ambiente, existe ainda muita falta de informação concreta e as inferências que se podem fazer através dos resultados reportados na literatura permanecem, em grande parte, conjecturais. Processos de degradação certamente ocorrerão no ambiente, mas muitos dos estudos realizados baseiam-se na utilização de materiais homogéneos, em termos de composição e morfologia, não contemplando assim a grande variabilidade de polímeros existentes no ambiente, não só em termos de forma e estrutura, mas também cor e na presença de aditivos, como antioxidantes e estabilizadores poliméricos. Adicionalmente, efeitos de matriz, como salinidade, variabilidade da temperatura, diária e sazonal ou variações de pH não são equacionadas, deixando assim uma elevada margem de erro aquando da interpretação e extrapolação dos dados obtidos. Por outro lado, no que concerne aos estudos de biodegradação, estes são muitas vezes baseados na utilização de culturas puras, muitas vezes em condições optimizadas, que não reflectem a biodiversidade existente e as interacções que estas comunidades microbianas têm não só sobre si, mas com o ecossistema em que se integram. Tais limitações ilustram, pois, a actual necessidade de realizar mais investigação sobre o comportamento e destino final destes materiais e de que forma podem afectar o meio ambiente.

5. EFEITOS DE MICRO- E NANOPLÁSTICOS

Apesar de os plásticos serem considerados materiais quimicamente inertes, muitos dos produtos comercializados incluem inúmeros aditivos, destinados a melhorar a durabilidade e/ou qualidade dos mesmos, aditivos esses que, tipicamente, são de baixo peso molecular, lipofílicos e não ligados covalentemente ao polímero [5, 19]. Consequentemente, podem ocorrer processos de lixiviação que resultam na libertação destes compostos para o meio ambiente e, dada a sua natureza lipofílica, existem indícios de que podem atravessar membranas celulares e participar em reacções bioquímicas, induzindo efeitos tóxicos [21]. Além destes aditivos, os próprios monómeros que estão na base dos diferentes polímeros, e que, devido a processos incompletos de polimerização, podem lixiviar para o ambiente, constituem também um factor de preocupação, já que, isoladamente, estes compostos podem apresentar elevada toxicidade. Por fim, alguns plásticos isolados a partir de amostras ambientais demonstraram também estar contaminados com outros poluentes, presentes no ambiente no qual são depositados, como poluentes orgânicos persistentes (POPs), resultante de processos de adsorção, o que pode ser de especial apreensão, dada a elevada área superficial de micro- e nanoplásticos. Claro está, as dinâmicas de adsorpção e desorpção dependerão não só das características do polímero – tipo de plástico, morfologia, modificações químicas, entre

outros – mas também do poluente. A vasta maioria dos estudos existentes sobre esta problemática, que carece de bastante investigação, têm-se focado, sobretudo, em ambientes aquáticos, sendo necessário, também, explorar estas cinéticas noutras matrizes, como solos, uma questão que, de uma forma geral, permanece transversal em todas as áreas de investigação envolvendo micro- e nanoplásticos.

Fisicamente, nano-, micro-, meso- (5 mm - 2cm) e macroplásticos (> 2cm) podem ser ingeridos por diferentes organismos situados em distintos níveis da cadeia alimentar, podendo causar danos físicos, como perfuração intestinal, e, no caso de partículas mais pequenas, como micro- e nanoplásticos, estes podem ser transportados através das diferentes teias alimentares, podendo, eventualmente, afectar a saúde humana [9, 14, 19-21]. Existem inúmeros estudos que detalham os diferentes efeitos bioquímicos observados numa enorme variedade de organismos, desde moluscos, ouriços-do-mar, peixes ósseos, minhocas e ratos, observando-se efeitos tão variados como limitações locomotoras, inibição de crescimento e atrasos no processo de maturação, bem como aumentos na taxa de mortalidade e produção de (pseudo)fezes e alterações comportamentais. De uma forma geral, os diferentes efeitos podem ser classificados como físicos e químicos, e categorizados como letais ou sub-letais. A conceptualização deste modelo de classificação está detalhado na Figura 5.

Apesar da (ainda) limitada, mas crescente, literatura científica relativa aos efeitos de micro- e nanoplásticos, existem indícios de que a exposição a estes materiais pode, de facto, ter consequências morfológicas, bioquímicas, comportamentais e reprodutivas numa vasta gama de organismos. Não obstante, muitos destes resultados são obtidos recorrendo a concentrações de micro- e nanoplásticos que não são ambientalmente relevantes e que, frequentemente, excedem em várias ordens de magnitude os valores reportados na literatura [22].

Torna-se assim evidente que não é apenas imprescindível um maior volume de investigação nestas temáticas, como é essencial que esta se foque em condições de relevância ambiental, não só no que concerne às concentrações destas partículas no ambiente, mas também sob as condições – físicas, químicas e biológicas – em que estas ocorrem. Tal, contudo, é de particular dificuldade no caso dos nanoplásticos, dado que ainda não existem estudos que, concreta e inequivocamente, demonstrem o seu isolamento de matrizes ambientais, enfatizando a necessidade de desenvolver e adaptar técnicas metodológicas que permitam tal análise e caracterização.

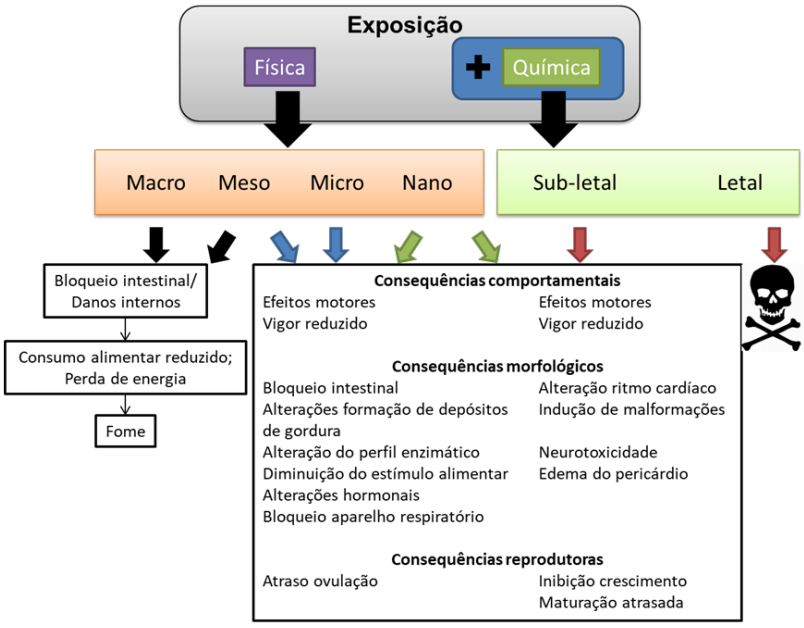

Figura 5. Um modelo conceptual dos potenciais efeitos de plásticos de diferentes tamanhos. De realçar que os efeitos de macro- e mesoplásticos são também observáveis em organismos mais pequenos e que a exposição química, isoladamente, pode resultar em alguns dos efeitos listados.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Existem poucas dúvidas sobre a ubiquidade dos micro- e nanoplásticos e da sua presença em todos os compartimentos ambientais. Contudo, pouco se sabe ainda sobre a sua distribuição geográfica e temporal, essenciais para estabelecer as dinâmicas de exposição dos organismos e correctamente inferir (potenciais) consequências dessa mesma exposição. Os últimos anos foram férteis em investigação sobre estes pequenos contaminantes ambientais, mas o muito que se aprendeu é uma pálida sombra sobre o muito que permanece desconhecido. Não só é indispensável desenvolver métodos analíticos que permitam o isolamento, identificação e caracterização destes materiais, como é também essencial determinar quais as consequências, se existentes, que a presença de micro- e nanoplásticos nas diferentes matrizes ambientais têm sobre os organismos, ou, potencialmente, sobre a saúde e bem-estar humanos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho beneficiou do apoio financeiro por parte do CESAM (UID/AMB/50017/2019), através de fundos nacionais (FCT/MEC) e do co-financiamento pelo FEDER, no âmbito do Programa PT2020, bem como do projecto IF/00407/2013/CP1162/CT0023, suportado por fundos nacionais através da FCT/MEC (PIDDAC). Este trabalho teve também o apoio do Orçamento de Estado, pela FCT, no âmbito do contrato previsto nos números 4, 5 e 6 do artigo 23º do Decreto-Lei 57/2016, de 29 de Agosto, modificado pela Lei 57/2017, de 29 de Julho. Adicionalmente, este trabalho é um contributo para o Projecto MicroPlasTox, com a referência POCI-01-0145-FEDER-028740, financiado pelo FEDER, através do COMPETE2020 e por fundos nacionais (OE), através da FCT/MCTES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Vert, M., et al., *Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC recommendations 2012). Pure and Applied Chemistry, 2012.* 84(2): p. 377-410.

2. PlasticsEurope, *Plastics – the Facts 2018, PlasticsEurope and EuPC, Editors. 2018, Plastics Europe: Brussels.*

3. da Costa, J.P., Micro- and nanoplastics in the environment: Research and policymaking. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2018. 1: p. 12-16.

4. Silva, A.B., et al., *Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review. Analytica Chimica Acta, 2018.* 1017: p. 1-19.

5. UNEP, *Marine Plastic Debris and Microplastics - Global lessons and research to inspire action and guide policy change, in Environment & green economy - Resource efficiency, U. Environment, Editor. 2016, United Nations: Nairobi.*

6. *Dautel, S.L., Transoceanic trash: international and United States strategies for the great Pacific Garbage Patch. Golden Gate U. Envtl. LJ, 2009.* 3: p. 181.

7. NOAA, *Microplastics One Pager, N.O.A.A. Administration, Editor. 2015, Department of Commerce: MD, USA.*

8. *De Falco, F., et al., Quantification of microfibres released during washing of synthetic clothes in real conditions and at lab scale⋆. The European Physical Journal Plus, 2018.* 133(7): p. 257.

9. Hartmann, N., et al. *Aquatic ecotoxicity testing of nanoplastics: lessons learned from nanoecotoxicology. in ASLO Aquatic Sciences Meeting. 2015. Granada, Spain.*

10. *EUCommission, Commission recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial (2011/696/EU). Off J Eur Union, 2011.* L275.

11. Wagner, M., et al., *Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. Environmental Sciences Europe, 2014.* 26(1): p. 1.

12. Zhang, H., et al., *Co-release of hexabromocyclododecane (HBCD) and nano-and microparticles from thermal cutting of polystyrene foams. Environmental science & technology, 2012.* 46(20): p. 10990-10996.

13. Stephens, B., et al., *Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. Atmospheric Environment, 2013.* 79: p. 334-339.

14. Sheavly, S.B. and K.M. Register, *Marine Debris & Plastics: Environmental Concerns, Sources, Impacts and Solutions. Journal of Polymers and the Environment, 2007.* 15(4): p. 301-305.

15. Hance, D., *Map Skills, Ocean Currents, Pollution, and … A Rubber Duck? AU - Mitchell, Jerry T. The Geography Teacher, 2014.* 11(3): p. 108-115.

16. Hohn, D., *Moby-Duck: The True Story of 28,800 Bath Toys Lost at Sea & of the Beachcombers, Oceanograp hers, Environmentalists & Fools Including the Author Who Went in Search of Them. 2011: Penguin Publishing Group.*

17. *Ebbesmeyer, C.C. and W.J. Ingraham Jr., Pacific toy spill fuels ocean current pathways research. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1994.* 75(37): p. 425-430.

18. Sherman, P. and E. van Sebille, *Modeling marine surface microplastic transport to assess optimal removal locations. Environmental Research Letters, 2016.* 11(1): p. 014006.

19. da Costa, J.P., et al.**,** *(Nano) plastics in the environment–sources, fates and effects. Science of The Total Environment, 2016.* 566: p. 15-26.

20. Lambert, S., C. Sinclair, and A. Boxall, *Occurrence, Degradation, and Effect of Polymer-Based Materials in the Environment, in Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Volume 227, M.D. Whitacre, Editor. 2014, Springer International Publishing: Cham. p. 1-53.*

21. *Hammer, J., M.H. Kraak, and J.R. Parsons, Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift. Rev Environ Contam Toxicol, 2012.* 220.

22. Phuong, N.N., et al., *Is there any consistency between the microplastics found in the field and those used in laboratory experiments? Environmental Pollution, 2016.* 211: p. 111-123.