



volume 13 • 2024 • art. 1

A POLUIÇÃO DO SOLO: CAUSAS, FONTES DOS PRINCIPAIS POLUENTES E CONSEQUÊNCIAS

O solo é um recurso importante para os ecossistemas, a vida selvagem e a agricultura. Desde a revolução industrial, milhares de compostos têm sido utilizados, produzidos e libertados involuntariamente ou até de forma voluntária (caso dos pesticidas e munições) para o ambiente, chegando ao solo. Vários tipos de poluentes provenientes de diversas fontes vão contaminar o solo, as águas superficiais e freáticas, e as respetivas cadeias alimentares. Estes compostos, na maioria de origem antropogénica, podem ser bioacumulados e bioamplificados o que os torna ainda mais problemáticos, nomeadamente: metais pesados/metalóides, fertilizantes orgânicos e minerais, plásticos, poluentes orgânicos persistentes, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, fármacos, drogas sintéticas e produtos de higiene pessoal, dioxinas pesticidas, e munições. Estes tóxicos estão presentes nos ecossistemas terrestres sob a forma de misturas que contribuem para a perturbação da fauna edáfica, poluição das culturas e alimentos, contaminação das linhas de água e lençóis freáticos através da sua lixiviação, provocando uma perda progressiva da biodiversidade e redução das funções/serviços do solo. O conhecimento das fontes, dos efeitos e mecanismos associados a esses contaminantes no funcionamento do ecossistema terrestre é fundamental para se poder evitar/prevenir os impactos irreversíveis e assim preservar a saúde do solo, a produção de alimentos saudáveis e a continuidade dos serviços de ecossistema, conservação da biodiversidade, vitais para a sobrevivência e bem-estar do ser humano.

Palavras-chave

solo
poluição
contaminação
tóxicos
fauna edáfica

Ondina Ribeiro^{1,2,3}

Maria J.I. Briones^{4,5}

Claúdia Ribeiro^{2,6}

Tiago Natal-da-Luz³

João Ricardo Sousa^{1,7}

João Soares Carrola^{1,7*}

¹ Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas, Univ. Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal.

² TOXRUN-Unidade de Toxicologia, Instituto Univ. Ciências da Saúde, Cooperativa de Ensino Superior Politécnico e Universitário, Gandra, Portugal.

³ Centro de Ecologia Funcional, Laboratório Associado TERRA, Departamento das Ciências da Vida, Univ. Coimbra, Portugal.

⁴ Departamento de Ecologia e Biologia Animal, Univ. Vigo, Espanha.

⁵ UK Centro de Ecologia e Hidrologia, Centro Ambiental Lancaster, UK.

⁶ Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Univ. Porto, Portugal.

* joao@utad.pt

ISSN 1647-323X

Artigo em acesso aberto sob [licença CC-BY](#)

© 2024 Autores

INTRODUÇÃO

O solo tem uma importância chave (de forma direta ou indireta) para a conservação da biodiversidade quer da flora como da fauna, e para o funcionamento normal dos ecossistemas. É um recurso natural limitado e a base das cadeias alimentares, apresentando numerosas funções e serviços de elevada importância socioeconómica, climática e ambiental sendo um recurso fundamental para a agricultura e pecuária. Porém, devido ao aumento da população e das numerosas atividades humanas, são cada vez maiores as pressões exercidas sobre este recurso, tendo como resultado fenómenos de contaminação, compactação, impermeabilização e/ou erosão que promovem uma diminuição na qualidade e funcionalidades dos solos. Com base nisto, podemos dizer que o solo é a base da vida (microrganismos, flora e fauna) e das cadeias tróficas (Figura 1) na terra (Nielsen et al., 2015) e deve ser conservado visto ser um recurso cada vez mais escasso.

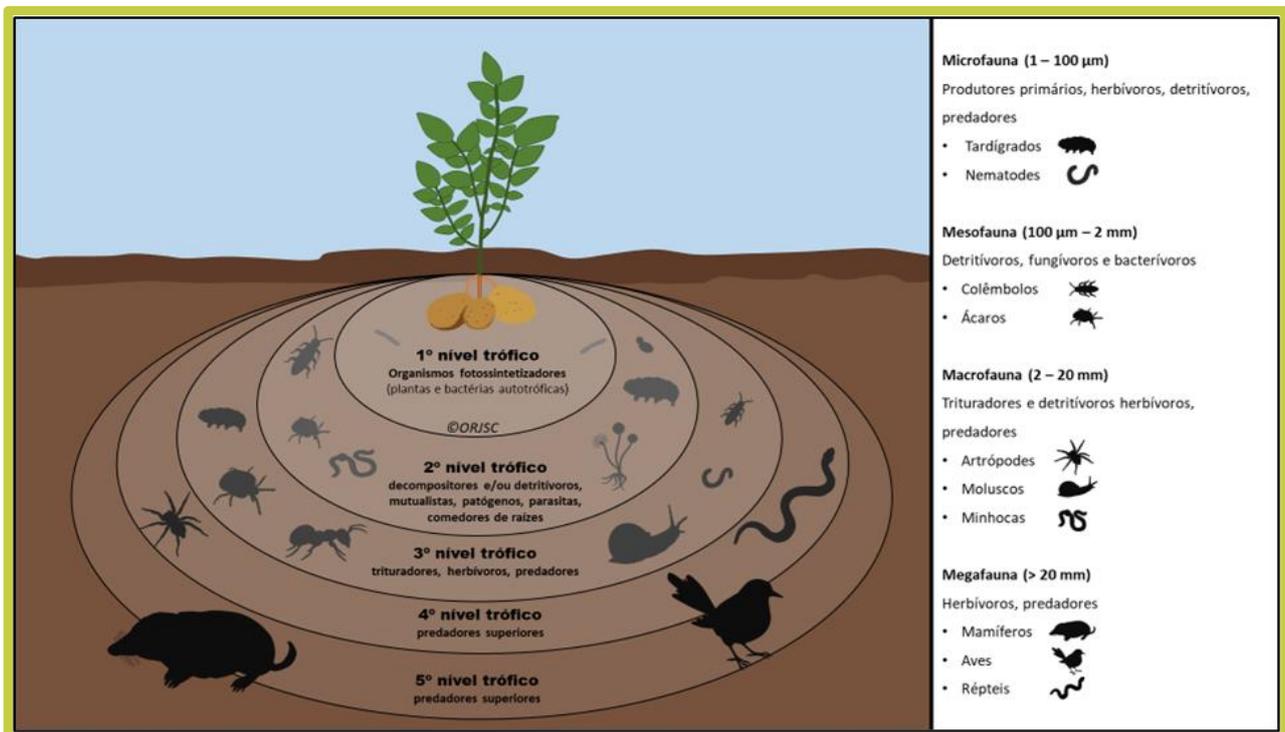


FIGURA 1: Esquema que mostra o solo como habitat das cadeias tróficas e da biodiversidade terrestre. Podem-se observar os diferentes níveis tróficos, com a presença de invertebrados edáficos, plantas, aves e mamíferos que contribuem para a vida, funções e serviços do solo.

O solo é definido como uma camada superficial pouco espessa da crosta terrestre (Orgiazzi et al., 2016), resultado das interações entre a atmosfera (clima), biosfera (fauna e flora) e geosfera (rochas e sedimentos que formam os primeiros metros da crosta terrestre). Das interações variadas entre componentes bióticos e abióticos, resulta uma mistura complexa de partículas minerais orgânicas, que se organizam espacialmente de formas variadas, influenciando o espaço poroso e a retenção de água, numa matriz que serve de suporte à existência e manutenção da biodiversidade.

Importância da conservação do solo

Esta associação complexa, entre a biologia do solo e as componentes abióticas, tem uma elevada importância nos processos de formação do solo, matéria orgânica, ciclo dos nutrientes (carbono (C), azoto (N), fósforo (P), enxofre (S), entre outros), bem como na degradação de contaminantes presentes (Cachada et al., 2018). De facto, o solo realiza diversos serviços do ecossistema (e.g. aprovisionamento, suporte, regulação e cultural) associados a processos ecológicos que contribuem para o bem-estar humano, sustentação da vida e do “habitat” para pessoas, animais, plantas e microrganismos, regulação do clima, produção de alimentos e forragem (produção de cereais, feno e outros alimentos para o gado), manutenção do ciclo da água e dos nutrientes, proteção da água subterrânea, entre outros (Briones, 2014; Ribeiro et al., 2022; Silver et al., 2021).

Os solos para além de reterem água possuem também a capacidade de remover e reter alguns contaminantes da água, os quais são removidos através da captura física pelos poros, sorção química para superfícies sólidas e através da biodegradação realizada por microrganismos que vivem no solo (Helmke e Losco, 2013).

É um recurso dinâmico, cujas variações nas respetivas características físicas, químicas e biológicas ocorrem como resposta às interações com outros compartimentos ambientais, nomeadamente hidrosfera, atmosfera e biosfera, ao longo do tempo (Cachada et al., 2018), influenciando desta forma a qualidade do ar, água, saúde animal e humana (Figura 2). Como referem Sethi e Gupta (2020), a saúde humana está diretamente associada à qualidade do solo, uma vez que no caso de solos de menor fertilidade o valor nutricional das colheitas e, conseqüentemente, dos alimentos são mais reduzidos

O solo é de facto um recurso escasso, multifuncional e vital para as cadeias alimentares sendo cada vez mais importante ser conservado para poder enfrentar melhor as alterações climáticas que se fazem sentir um pouco por todo o planeta e limitações associadas em termos de disponibilidade de alimentos no comércio mundial e local. O comércio de produtos agrícolas duplicou entre 1995 e 2018 (FAO, 2020) e a globalização dos mercados de produtos agrícolas levou ao transporte de nutrientes do solo do local de origem para outras regiões (Grote et al., 2005) contribuindo para também para a transferência de tóxicos entre zonas produtoras de alimento e as zonas de consumo.

Posto isto, é essencial ter o solo saudável e vivo, isto é, um ecossistema vivo e dinâmico, rico em organismos microscópicos e macroscópicos que desempenham na sua globalidade muitas funções vitais, incluindo a conversão de matéria morta e em decomposição, bem como minerais em nutrientes vegetais (ciclo dos nutrientes); controle de pragas e doenças das plantas, e ervas daninhas; melhorando a estrutura do solo com efeitos positivos para o teor em água do solo e capacidade de retenção de nutrientes e, finalmente, melhorando a produção das culturas agrícola e a produção animal. Um solo saudável também contribui para mitigar as mudanças climáticas, mantendo ou aumentando o seu teor de carbono, permitindo suportar melhor as variações crescentes da pluviosidade e da temperatura, numa ótica de segurança alimentar (Tully e Ryals, 2017).

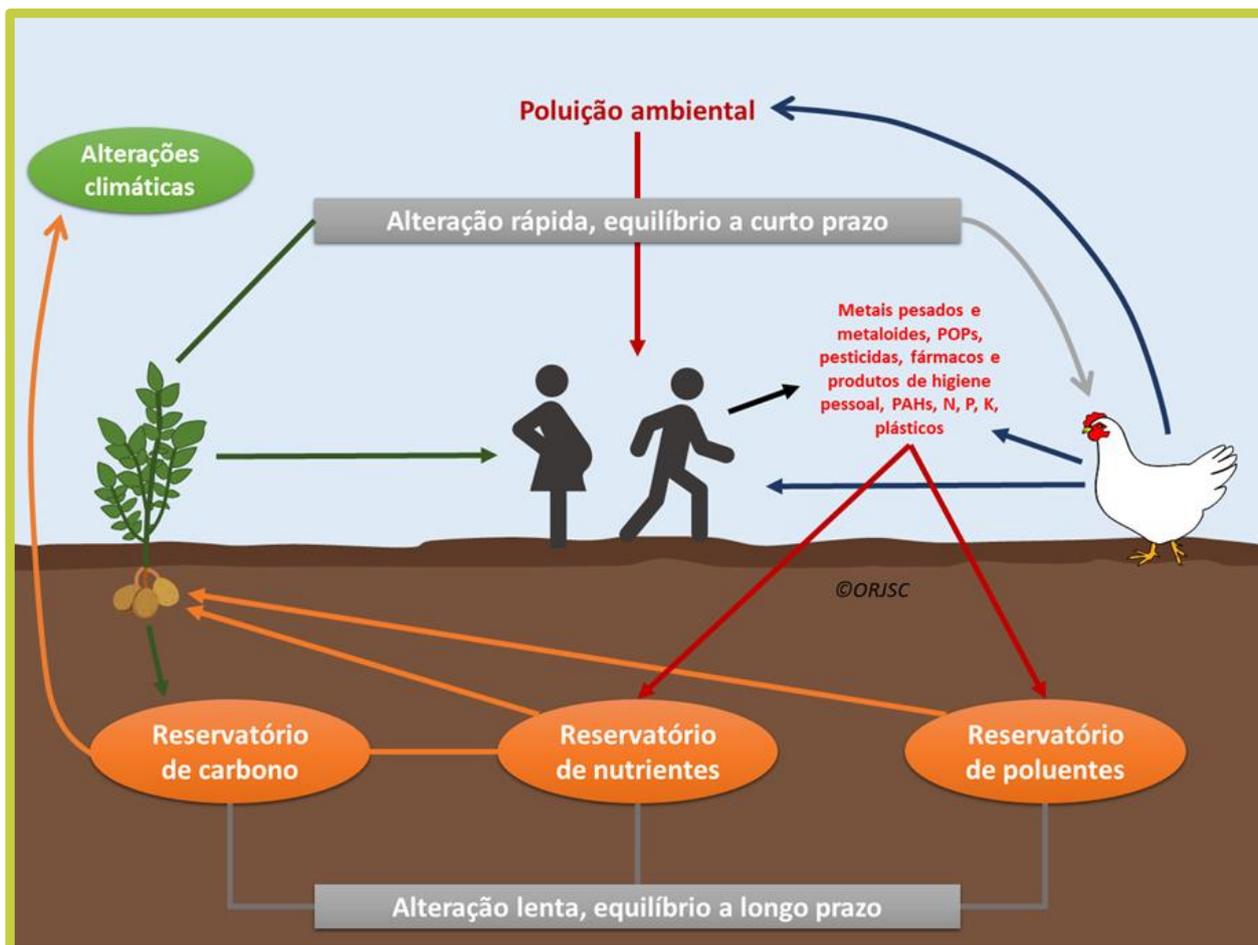


FIGURA 2: Diagrama da relação entre o solo, os alimentos, o ambiente e o ser humano. A poluição terrestre pode levar à contaminação ambiental e de todas as cadeias tróficas até ao ser humano, afetando desta forma a saúde humana e animal (adaptado de Gu et al. (2021)).

O papel dos agricultores e das políticas agrícolas são fundamentais, de forma a implementar práticas mais sustentáveis, mais produtivas e mais amigas do solo como agroecologia, agricultura orgânica, agricultura de conservação, mais tecnologia para maior eficiência na rega e produção, sistema agroflorestal, entre outras. A produção de alimentos de qualidade e a segurança alimentar (todas as pessoas tem acesso a comida suficiente, saudável e equilibrada em termos nutricionais), incluem a produção de quantidades suficientes de alimentos, teor adequado de nutrientes nos produtos alimentícios e a redução/remoção de compostos potencialmente tóxicos dos produtos alimentícios (Hubert et al., 2010; Wang, 2022).

FONTES DE CONTAMINAÇÃO E POLUIÇÃO DOS SOLOS

A industrialização na Europa (e no resto do mundo) e as inúmeras atividades antropogénicas tem levado à libertação voluntária e involuntária de centenas de compostos naturais e sintéticos que, na maioria dos casos, têm como destino final a água e o solo. Desta forma, existem cerca de 2.8 milhões de locais com solos contaminados no mundo, e em Portugal estão referenciados 1593 potenciais fontes localizadas (Gomes e Lanceiro, 2019). Foram identificados cerca de 181 locais com necessidade de intervenção dos

quais, cerca de 83, já foram submetidos a processos de recuperação ou remediação (Pérez e Eugenio, 2018).

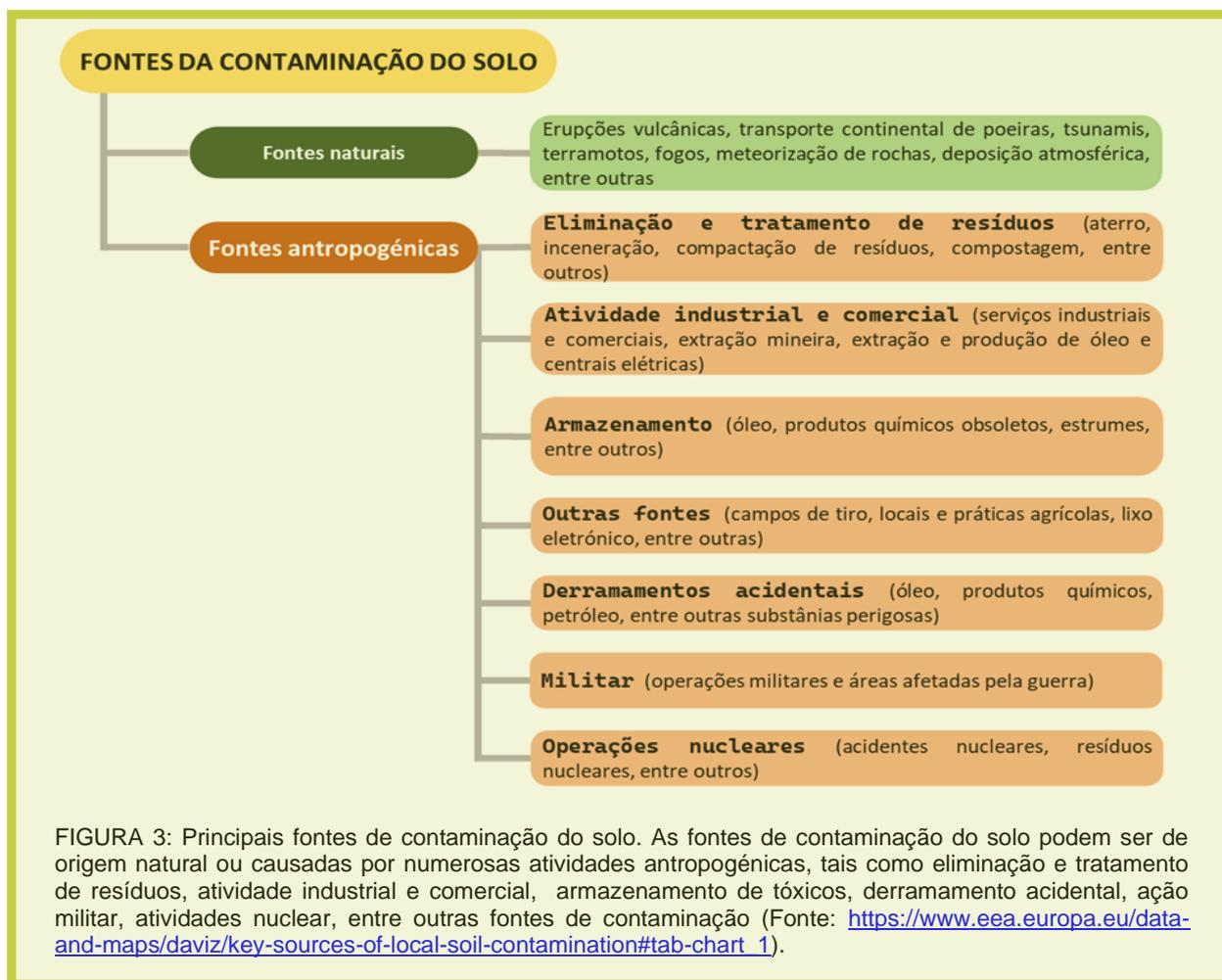
A presença de uma substância que inadvertidamente se encontra em concentrações acima do nível normal leva à contaminação do solo. Já a poluição edáfica está relacionada com os efeitos biológicos que a contaminação pode exercer nos organismos terrestres (Chapman, 2007). Assim, todos os poluentes são considerados contaminantes, mas nem todos os contaminantes são poluentes. Isto deve-se ao facto de os compostos inseridos no ecossistema terrestre poderem estar mais ou menos disponíveis para os organismos. Essa disponibilidade depende de diversos fatores, como por exemplo a estrutura química do contaminante ou as características do solo (Chapman et al., 2003).

A contaminação do solo tem vindo a aumentar nas últimas décadas e é considerada um problema global tanto para o ambiente como para os seres humanos, constituindo um problema grave para a biodiversidade mas também de segurança alimentar (Khan et al., 2021). A contaminação edáfica está relacionada com as alterações no ambiente natural do solo através de causas naturais e principalmente, de causas antropogénicas (Figura 3), que resultam numa acumulação de contaminantes no solo (Rodríguez-Eugenio et al., 2018; Sethi e Gupta, 2020). As causas naturais podem incluir erupções vulcânicas, terremotos, tsunamis, transporte continental de poeiras, fogos, meteorização das rochas, entre outras (Khan et al., 2021), enquanto que as causas antropogénicas incluem atividade agrícola, industrial e comercial (como explorações e práticas agrícolas, serviços industriais e comerciais, extração mineira, extração e produção de óleo e centrais elétricas), militar (operações militares e áreas afetadas pela guerra), armazenamento (óleo, produtos químicos obsoletos, estrumes, entre outros), derramamentos acidentais (óleo, produtos químicos, petróleo, entre outras substâncias perigosas), entre outras fontes de contaminação (Ali et al., 2021; Khan et al., 2021; Natal-da-Luz et al., 2009; Palansooriya et al., 2020; Wang et al., 2021).

A crescente contaminação do solo através da inserção de diversos contaminantes no ecossistema terrestre leva a que alguns destes contaminantes causem poluição no solo produzindo vários efeitos no solo, culturas e biodiversidade. Alguns dos efeitos da poluição no solo (Tabela 1) são a redução da fertilidade, redução da capacidade de fixação de N, contaminação da água potável subterrânea e superficial, erosão do solo, emissão de gases tóxicos, perda de nutrientes e do rendimento das culturas, desequilíbrio ecológico e perda de biodiversidade. Quando a contaminação do solo ultrapassa o nível de concentração limite (Rodríguez-Eugenio et al., 2018) estas alterações são consideradas uma ameaça, uma vez que a qualidade edáfica é deteriorada e o solo torna-se assim inadequado para produção agrícola.

TABELA 1: Efeitos da poluição do solo causada pela agricultura, indústria e ambiente (adaptado de Sethi e Gupta (2020)).

AGRICULTURA	INDÚSTRIA	AMBIENTE
Redução da fertilidade do solo	Desequilíbrio ecológico	Alteração da biota do solo
Redução da capacidade da fixação do N	Contaminação da água subterrânea	Erosão do solo
Aumento da erosão	Redução da vegetação	
Redução do rendimento das culturas	Libertação de gases com efeitos na saúde	
Perda de nutrientes	Libertação de raios radioativos	
Desequilíbrio na fauna e flora		



Como descrito, a presença de elementos tóxicos pode alterar o ambiente natural e eventualmente afetar os ecossistemas e a saúde humana mediante processos de bioamplificação, através do consumo de alimentos. Assim, são necessárias soluções ecológicas para a mitigação do risco dos poluentes no solo e, conseqüentemente, nos alimentos. Algumas das medidas que podem ser implementadas para a preservação do solo e mitigar os efeitos da ação antropogênica são a manutenção da cobertura vegetal, melhoramento das técnicas agrícolas, reflorestamento, política ambiental dos 3 R's



FIGURA 4: Principais poluentes encontrados no solo e que contribuem para o aumento da contaminação edáfica.

ambientais (reduzir, reciclar e reutilizar), entre outras práticas (Lee et al., 2016; Wall et al., 2015).



PRINCIPAIS POLUENTES ENCONTRADOS NO SOLO

Como referido anteriormente, as atividades antropogénicas são a principal causa de contaminação do solo e a principal via de introdução de poluentes nos ecossistemas. Os poluentes são substâncias ou materiais que estão presentes no solo em concentrações que podem causar efeitos nefastos na saúde das plantas, animais e/ou seres humanos, afetando assim o ambiente. Existe uma grande variedade de compostos que podem poluir o solo (Figura 4), desde iões inorgânicos até moléculas orgânicas complexas, sendo normalmente classificados em dois grandes grupos: poluentes inorgânicos e orgânicos (Cachada et al., 2018).

Os poluentes inorgânicos são elementos não biodegradáveis e, por isso, acumulam-se no solo, e consequentemente, entram nas cadeias alimentares (Fijalkowski et al., 2017). Entre os poluentes inorgânicos destacam-se os metais (chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), cobre (Cu), zinco (Zn), entre outros), metaloides (boro (B), arsénio (As), silício (Si)), não metais (selénio (Se) e o S), actinoides (urânio (U) e o plutónio (Pu)) e os halogénios (flúor (F), cloro (Cl) e Iodo (I)) (Hooda, 2010).

Dos poluentes orgânicos fazem parte os compostos que possuem carbono na sua estrutura (Begum et al., 2021), tais como os pesticidas, fármacos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), poluentes orgânicos persistentes (POPs), entre outros. Muitos destes compostos sofrem oxidação biológica, no entanto outros são bastante resistentes a estes processos de transformação, persistindo no solo durante bastante tempo (Cachada et al., 2018). Devido às diferenças nas suas propriedades, estes compostos possuem comportamentos distintos no ambiente e diferente toxicidade nos organismos. Apesar de diversos compostos orgânicos terem sido banidos, muitos outros continuam a ser produzidos e utilizados, sendo constantemente inseridos nos ecossistemas (Burgess, 2013) entrando assim nas cadeias alimentares e nos alimentos.

Metais e metaloides

No grupo dos metais pesados e metaloides fazem parte os elementos com elevada massa atómica (> 4,5 g/cm³) e que podem causar problemas toxicológicos. Alguns destes elementos (por exemplo, Cu, ferro (Fe) e Zn) são considerados micronutrientes, uma vez que são essenciais em baixas concentrações para os microrganismos, plantas, animais e humanos. No entanto, em concentrações elevadas, causam fitotoxicidade e problemas na saúde animal e humana (Rodríguez-Eugenio et al., 2018). Por outro lado, alguns destes poluentes inorgânicos são tóxicos mesmo quando presentes no solo em baixas concentrações, como é o caso do Hg, Pb, Cd, As, entre outros.

No solo, quando estes poluentes estão presentes numa concentração inferior a 100 mg/kg são considerados elementos-traço. Por outro lado, outros elementos ocorrem tipicamente a concentrações mais elevadas sendo denominados de elementos potencialmente tóxicos (Palansooriya et al., 2020).

Os metais podem chegar ao solo de forma natural através das rochas características da geologia local, mas também através de diversas atividades antropogênicas, como por exemplo complexos industriais, exploração de depósitos minerais, eliminação de resíduos metálicos, uso da gasolina com Pb até 2021, tintas com Pb, aplicação de fertilizantes, estrumes de animais, adubos, lamas das estações de tratamento de águas residuais (ETARs), pesticidas à base de Cu e As, irrigação com águas residuais, resíduos de combustão de carvão, derrame de petroquímicos e deposição atmosférica de diversas fontes (Alloway, 2012; Cachada et al., 2018; Sethi e Gupta, 2020; Ye et al., 2022). O lixo eletrônico (e-waste) é também uma fonte importante de Pb, antimônio (Sb), Hg, Cd e níquel (Ni) para o solo (Robinson, 2009).

As guerras contribuem também para a contaminação dos solos com metais pesados. que poderão afetar as culturas produzidas e a qualidade dos alimentos consumidos pelo Homem (Certini et al., 2013). O uso intensivo e em grande escala de diversos tipos de armas, munições e explosivos, contribui para a contaminação a longo prazo com Pb, cromo (Cr), Sb, As, Cd, Cu, Hg, Ni e Zn, através da frequente libertação no para o solo por resíduos de armas (Ghanbarizadeh e Nejad, 2012).

Efeitos dos metais e metaloides

A poluição do solo com metais pesados e metaloides é uma ameaça global e que afeta a qualidade do solo/água, a germinação e crescimento das plantas, e causa um efeito adverso severo no ecossistema terrestre. Além disso, os metais pesados causam problemas diversos na saúde humana mesmo quando presentes em quantidades muito baixas durante longos períodos de exposição: teratogênicos, mutagênicos e neurotóxicos (Clemens & Ma, 2016; Tchounwou, Yedjou, Patlolla, & Sutton, 2012). Além disso, a contaminação dos solos com metais pesados e metaloides pode afetar as culturas produzidas e a qualidade dos alimentos consumidos pelo Homem (Certini et al., 2013).

A exposição a metais pesados estes poluentes é uma preocupação importante para a saúde humana. Os metais pesados com maior toxicidade para o Homem, incluem o Cd, Pb, Hg e As, não possuem nenhuma função biológica e interferem em numerosas atividades enzimáticas sendo neurotóxicos e nefrotóxicos (Engwa et al., 2019). Além disso, os metais pesados causam problemas diversos na saúde humana mesmo quando presentes em quantidades muito baixas durante longos períodos de exposição: teratogênicos, mutagênicos e neurotóxicos (Clemens e Ma, 2016; Tchounwou et al., 2012) e cancerígenos (Chen et al., 2019).

Fertilizantes minerais

O N, P e potássio (K) são nutrientes essenciais para as plantas, constituindo a base dos fertilizantes usados na manutenção da fertilidade de solos agrícolas podendo, quando presentes em quantidades excessivas, dar origem a fenômenos de contaminação. Para além das práticas agrícolas, outras vias podem estar associadas à presença excessiva destes elementos no solo, nomeadamente atividades industriais, tratamento de resíduos e derramamentos acidentais (Sethi e Gupta, 2020).

O excesso de N, P e K no solo pode causar fenômenos de eutrofização da água, principalmente com P (He, Lao, Jin, Zhu, & Chen, 2023) em ecossistemas lênticos (como barragens, lagos, etc.), através da sua lixiviação e escurimentos, promovendo o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, com a consequente redução do oxigênio dissolvido e morte de organismos aquáticos, incluindo os peixes

(Cachada et al., 2018; Chislock, Doster, Zitomer, & Wilson, 2013). Este problema é agravado durante os períodos mais quentes, principalmente no verão, e em particular em ecossistemas que apresentam alguma poluição aquática (Godinho et al., 2019). Estes nutrientes podem, ainda, contribuir para a acidificação do solo com a consequente alteração da biodiversidade edáfica (Liang et al., 2013).

A aplicação excessiva de fertilizantes com N, pode levar à poluição do solo com nitratos e nitritos, e consequentemente das águas, tanto superficiais como subterrâneas.

Efeitos dos fertilizantes minerais

O excesso de N, P e K no solo pode causar fenómenos de eutrofização da água, principalmente com P (He et al., 2023) em ecossistemas lênticos (como barragens, lagos, etc.), através da sua lixiviação e escurrimentos, promovendo o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, com a consequente redução do oxigénio dissolvido e morte de organismos aquáticos, incluindo os peixes (Cachada et al., 2018; Chislock et al., 2013). Este problema é agravado durante os períodos mais quentes, principalmente no verão, e em particular em ecossistemas que apresentam alguma poluição aquática (Godinho et al., 2019). Estes nutrientes podem, ainda, contribuir para a acidificação do solo com a consequente alteração da biodiversidade edáfica (Liang et al., 2013).

Adicionalmente, a presença de concentrações elevadas de nitritos nos solos pode levar à sua presença na água e nos alimentos, e consequentemente causar meta-hemoglobinemia severa em recém-nascidos e adultos (Vale e Haie, 2006).

Fertilizantes orgânicos

Os fertilizantes orgânicos são muito utilizados na agricultura para a melhoria da saúde do solo através do enriquecimento com C orgânico e libertação lenta de nutrientes. Alguns destes fertilizantes podem ser estrume animal, lamas de ETARs, biosólidos municipais e resíduos de processamento de alimentos (Khan et al., 2018).

Efeitos dos fertilizantes orgânicos

Apesar dos benefícios para o solo, os fertilizantes orgânicos também podem ser uma fonte de poluição do solo devido à mineralização do N orgânico que leva ao aumento das concentrações de nitrato, presença de oligoelementos, substâncias alquiladas poli ou perfluoradas, retardantes da chama entre outras substâncias (FAO, 2021). Devido ao crescente interesse na produção orgânica e de alimentos de forma biológica, o uso de fertilizantes orgânicos tem aumentado levando à crescente presença destes compostos nos ecossistemas terrestres.

Plásticos e microplásticos

Os plásticos são muito utilizados na produção de determinadas culturas agrícolas entre outros usos e constituem mais um tipo de contaminantes dos solos, podendo sofrer decomposição ou fragmentação

formando partículas de menor tamanho. Estes materiais podem ser transportados pelo vento e água para o solo, onde podem afetar as plantas, animais e microrganismos (Rodríguez-Eugenio et al., 2018).

Os resíduos de plástico podem ser encontrados no solo como fragmentos, fibras, microplásticos e nanoplásticos, levando à contaminação dos solos agrícolas e não agrícolas. Adicionalmente os fragmentos de plástico podem interferir fisicamente com o crescimento das plantas e podem afetar a germinação das sementes (Liwarska-Bizukojc, 2022). Os microplásticos (tamanho entre 1 a 1000 µm) e nanoplásticos (tamanho menor que 1000 nm) podem ser ingeridos pelos organismos do solo (Bermúdez & Swarzenski, 2021) promovendo a redução do crescimento e aumento da mortalidade resultantes de dificuldades na alimentação (de Souza Machado, Kloas, Zarfl, Hempel, & Rillig, 2018; Rillig, 2012).

Os plásticos permanecem longos períodos de tempo no ambiente e acabam por se degradar em partículas cada vez menores, com maior superfície de contato (Pironti et al., 2021). Este aumento da superfície específica leva a que estes fragmentos possam absorver/adsorver melhor vários poluentes tóxicos tornando-os mais nocivos e, conseqüentemente, expor os organismos a estes compostos para além dos aditivos dos plásticos aquando do seu consumo (Wang et al., 2019).

Efeitos dos plásticos e microplásticos

Os fragmentos de plástico podem interferir fisicamente com o crescimento das plantas e podem afetar a germinação das sementes (Liwarska-Bizukojc, 2022). Os microplásticos (tamanho entre 1 a 1000 µm) e nanoplásticos (tamanho menor que 1000 nm) podem ser ingeridos pelos organismos do solo (Bermúdez & Swarzenski, 2021) promovendo a redução do crescimento e aumento da mortalidade resultantes de dificuldades na alimentação (de Souza Machado et al., 2018; Rillig, 2012).

Além dos efeitos descritos, o aumento da superfície específica dos fragmentos de plásticos leva a que estes fragmentos possam absorver/adsorver melhor vários poluentes tóxicos tornando-os mais nocivos e, conseqüentemente, expor os organismos a estes compostos para além dos aditivos dos plásticos aquando do seu consumo (Wang et al., 2019).

Pesticidas

Os pesticidas ou fitofármacos são químicos utilizados para o controlo de insetos, ervas daninhas e doenças causadas por fungos e outros organismos patogénicos. Estes podem entrar no solo através de diversas vias, incluindo práticas agrícolas, atividades industriais, entre outras (Burgess, 2013).

Quando aplicados nas culturas, os pesticidas contaminam o ar e o solo agrícola, e podem ser arrastados por escorrência pela água da chuva para os rios e lençóis freáticos próximos prejudicando os organismos aquáticos (Cachada et al., 2018). Também podem ser transportados pelo vento, levando à contaminação de outras áreas adjacentes (Rodríguez-Eugenio et al., 2018).

Os pesticidas, nomeadamente inseticidas, herbicidas, fungicidas e nematicidas, podem ter uma série de efeitos negativos nos organismos do solo, incluindo redução do crescimento e reprodução, aumento da mortalidade e alterações no comportamento. Podem, igualmente, prejudicar insetos benéficos (como as abelhas) e outros organismos que ajudam a controlar as pragas (Mahmood, Imadi, Shazadi, Gul, & Hakeem, 2016).

Os solos das áreas urbanas também são poluídos com produtos químicos orgânicos como resultado de diversas atividades industriais, queima de carvão, emissões de veículos automotores, incineração de resíduos, e despejo de esgoto e resíduos sólidos (Leake et al., 2009).

Efeitos dos Pesticidas

Os pesticidas, nomeadamente inseticidas, herbicidas, fungicidas e nematicidas, podem ter uma série de efeitos negativos nos organismos do solo, incluindo redução do crescimento e reprodução, aumento da mortalidade e alterações no comportamento. Podem, igualmente, prejudicar insetos benéficos (como as abelhas) e outros organismos que ajudam a controlar as pragas (Mahmood et al., 2016).

Os impactos negativos na saúde do solo, podem também surgir através da redução da biodiversidade edáfica e alteração das comunidades microbianas com consequências na produtividade das culturas e no meio ambiente que perde resiliência a fatores adversos como resultado da perda de redundância funcional (Carré et al., 2017). Tanto os solos agrícolas como urbanos apresentam na sua maioria misturas complexas de produtos químicos orgânicos e outros tóxicos.

Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

Os PAHs são uma classe de compostos orgânicos, persistentes e semi-voláteis. Estes podem ser encontrados no solo devido a aplicações industriais, uso de combustíveis fósseis e agroquímicos, atividades agrícolas e florestais (Lerda et al., 2011).

Os PAHs podem entrar no solo através de várias formas, devido a derrames acidentais, descargas industriais e deposição inadequada de resíduos. Podem acumular-se no solo e nos sedimentos, onde afetam a saúde dos organismos que vivem no solo, incluindo plantas, animais e microrganismos (Rodríguez-Eugenio et al., 2018). Devido à sua reduzida ou inexistente polaridade e persistência, os PAHs podem acumular-se, e permanecer no solo por longos períodos de tempo originando diversos efeitos adversos, como a redução do crescimento e da reprodução de plantas e animais, alteração dos processos bioquímicos no solo, efeitos tóxicos nos organismos que dependem do solo para sua sobrevivência e redução da biodiversidade e da qualidade do solo (Balseiro-Romero e Baveye, 2018; Lin et al., 2013). Estes compostos têm tendência a bioacumular-se nos organismos, gerando bioamplificação nas cadeias alimentares terrestres como é o caso do diclorodifeniltricloroetano (DDT) (Pattnaik, Pany, Dena, Pal, & Sahu, 2020). É importante realçar que determinados PAHs, pelas respetivas características químicas, podem ser cancerígenos, mutagénicos, teratogénicos e, portanto, podem representar um risco acrescido para a saúde humana (Larsen, 2008).

A presença de PAHs nas águas subterrâneas e no solo, podem ser considerados excelentes indicadores da poluição urbana (Balderacchi et al., 2014). Estes compostos também podem ser introduzidos no solo devido a fogos florestais causados pelas alterações climáticas, guerra, entre outros (Vergnoux et al., 2011).

Efeitos dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

A presença de PAHs no solo ao longo do tempo pode originar diversos efeitos adversos, como a redução do crescimento e da reprodução de plantas e animais, alteração dos processos bioquímicos no solo, efeitos

tóxicos nos organismos que dependem do solo para a sua sobrevivência, e a redução da biodiversidade e da qualidade do solo (Balseiro-Romero e Baveye, 2018; Lin et al., 2013).

Estes compostos têm tendência a se bioacumular-se nos organismos, gerando bioamplificação nas cadeias alimentares terrestres como é o caso do diclorodifeniltricloroetano (DDT) (Pattnaik et al., 2020). É importante realçar que determinados PAHs, pelas respetivas características químicas, podem ser cancerígenos, mutagénicos, cancerígenos e teratogénicos e, portanto, podem representar um risco acrescido para a saúde humana (Larsen, 2008).

Poluentes orgânicos persistentes

Os POPs são substâncias químicas muito estáveis (resistem à degradação sob condições naturais) e persistem no ambiente. Uma vez dispersas no ambiente, propagam-se através do vento, chuva e água a distâncias consideráveis. São maioritariamente compostos lipofílicos, com elevada afinidade com a matéria orgânica e as membranas lipídicas celulares, desenvolvendo a capacidade de se armazenar nos tecidos gordos (Cachada et al., 2018). Sendo assim, apresentam grande facilidade de se acumularem nos organismos (bioacumulação) e nas cadeias alimentares (bioamplificação), podendo causar efeitos adversos no ambiente e na saúde humana (Zacharia, 2019).

Na Convenção de Estocolmo, no âmbito de um tratado internacional, assinado em 2001, foi criada a regulamentação para a proteção dos seres humanos e do meio ambiente contra a contaminação dos POPs. Inicialmente, foram incluídos doze POPs, lista que foi, entretanto, alargada e na qual, até ao momento, estão incluídos mais de vinte compostos (ver <https://echa.europa.eu/pt/list-of-substances-subject-to-pops-regulation>).

Efeitos dos poluentes orgânicos persistentes

Estes compostos São maioritariamente compostos lipofílicos, com elevada afinidade com a matéria orgânica e as membranas lipídicas celulares, desenvolvendo a capacidade de se armazenar nos tecidos gordos (Cachada et al., 2018). Os POPs podem permanecer intactos no solo por longos períodos de tempo, Sendo assim, apresentam grande facilidade de se acumularem nos organismos (bioacumulação) e nas cadeias alimentares (bioamplificação), podendo causar efeitos adversos no ambiente e na saúde humana (Zacharia, 2019). Devido às suas propriedades, podem exercer toxicidade, carcinogénese, mutagénese e teratogénese nos Homens.

Fármacos, drogas e produtos de higiene pessoal

Os fármacos, tais como substâncias psicoativas, antidepressivos, antidiabéticos, produtos para redução da hipertensão, antibióticos, hipolipemiantes, entre outros, as drogas e os produtos de cosmética e higiene pessoal, são uma classe de contaminantes químicos de importância emergente, biologicamente ativos e com ação nos organismos selvagens como a fauna do solo, podendo também afetar indiretamente o ser humano (Boxall et al., 2012). Desta forma, torna-se importante conhecer o seu destino, os efeitos e os riscos potenciais quando estão presentes no ambiente, em particular no solo (Daughton e Ternes, 1999). Devido ao aumento da sua utilização, estes compostos e os seus metabolitos têm sido detetados nas águas

residuais urbanas devido à ineficiência dos tratamentos convencionais das ETARs. A aplicação de lamas de ETARs e biosólidos contaminados como fertilizantes, pode levar à introdução destes compostos no ecossistema terrestre, causando efeitos tóxicos nos organismos presentes e afetando a saúde do solo (Wu et al., 2010).

Efeitos dos Fármacos, drogas e produtos de higiene pessoal

A presença de fármacos, cosméticos e produtos de higiene pessoal nos ecossistemas por um longo período de tempo, pode provocar toxicidade crônica no solo e, conseqüentemente, afetar a vida dos organismos terrestres, com efeitos no seu comportamento, reprodução, sobrevivência, entre outros (Chalew e Halden, 2009).

Tem-se observado um aumento na tendência do consumo de substâncias psicoativas e a sua entrada no solo tem gerado uma preocupação crescente, uma vez que têm sido detetadas substâncias psicoativas na água potável e na água da torneira (How e El-Din, 2021). Adicionalmente, estas substâncias também têm sido encontradas nos alimentos para consumo humano, especificamente nas culturas (Beltrán et al., 2020) e nos frutos do mar (Bhalsod et al., 2018). Dadas as propriedades destes poluentes pseudopersistentes, estes podem prejudicar a ecologia do solo e os organismos edáficos (Gualano et al., 2014; Silva et al., 2022), no entanto pouco se sabe sobre os possíveis efeitos tóxicos que podem exercer nos organismos e populações.

Dioxinas

A poluição do solo por dioxinas tem aumentado acentuadamente e é extremamente tóxica e perigosa para a saúde humana e para o meio ambiente. As dioxinas são emitidas de forma natural através de erupções vulcânicas, fogos florestais e combustão natural. No entanto, as principais fontes de emissão de dioxinas para o ambiente são de origem antropogénica, tais como combustão de combustível, produção de metal, produção e uso de pesticidas, inceneração de resíduos, incêndios acidentais, disposição em aterros, combustão e escoamento de herbicidas agrícolas (Kim et al., 2003; Nhung et al., 2022; Vergnoux et al., 2011). Durante as últimas décadas, foi chamada a atenção para estes compostos por causa de seus potenciais efeitos adversos nos seres humanos e na vida selvagem (De Filippis et al., 2022; Nisbet & Lagoy, 1992).

As dioxinas presentes no solo são tipicamente sólidas e aderem às partículas do solo, podendo sofrer difusão e dispersão, bem como processos de biodegradação (bioaumento, bioestimulação e fitorremediação) (Halden e Dwyer, 1997). A tecnologia de biorremediação (bioaumento, bioestimulação e fitorremediação) é considerada uma tecnologia ótima e ambientalmente amigável, com o objetivo de aplicar comunidades microbianas nativas e usar espécies vegetais com alta biomassa para tratar dioxinas contaminadas no solo (Nhung et al., 2022).

Efeitos das Dioxinas

As dioxinas podem persistir no ambiente por um longo período de tempo, devido à sua estabilidade química e baixa taxa de degradação. Durante as últimas décadas, foi chamada a atenção para estes compostos

presença de dioxinas no solo por causa de seus potenciais efeitos adversos nos seres humanos e na vida selvagem (De Filippis et al., 2022; Nisbet e Lagoy, 1992).

A toxicidade das dioxinas pode afetar a biodiversidade do solo, desde insetos até aos microrganismos com um papel crucial na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem dos nutrientes. Desta forma, a fertilidade do solo será afetada negativamente, e conseqüentemente a saúde do ecossistema. Adicionalmente, as dioxinas têm a capacidade de se acumular nos organismos, incluindo as plantas, o que pode levar à contaminação dos alimentos e da cadeia alimentar representando um risco para a saúde animal e humana (potencial carcinogénico). A presença destes compostos no solo pode ainda afetar a agricultura, reduzindo a produtividade das colheitas e limitando o uso do solo para cultivo devido à sua toxicidade (Nhung et al., 2022).

Explosivos convencionais e agentes de guerra química

A utilização massiva de armas, nomeadamente explosivos e munições de diversos tipos bem como de agentes químicos nas diversas atividades militares, causam um grande impacto nos solos. Estes efeitos nocivos são cada vez maiores devido aos avanços tecnológicos com armas cada vez mais potentes e devastadoras. Esta situação é agravada pela extensão (no tempo e na área) desses conflitos, que podem durar anos em que ambas as partes envolvidas contribuem de forma severa para a destruição e contaminação do ambiente em território inimigo, sendo já uma prática ancestral (Mitsevich et al., 2000). Por exemplo, os campos de batalha da Primeira e Segunda Guerra Mundial apresentam ainda nos dias de hoje uma elevada contaminação do solo com explosivos (Ounmany, 2021).

Alguns dos compostos que podem ser encontrados são os compostos explosivos nitroaromáticos, como por exemplo o trinitrotolueno, os quais têm elevada toxicidade para o meio ambiente e saúde humana (FAO, 2021).

Temos ainda os agentes de guerra química que podem ser agentes neurotóxicos, originalmente produzidos como pesticidas, no entanto usados para fins militares devido à sua toxicidade (Newmark, 2004). Por exemplo, durante a guerra do Vietnã entre 1955 e 1975 foi utilizado o herbicida ácido 2,4,5-Triclorofenoxiacético (2,4,5-T), mais conhecido como “Agente Laranja”, que visava a “desfoliação” das florestas e causou a destruição de cerca de 2 milhões de hectares de florestas tropicais (Stellman et al., 2003) bem como a destruição dos campos de arroz, contaminando os solos (My et al., 2021). Por outro lado, a exposição das pessoas a este herbicida levou ao desenvolvimento de câncros, distúrbios congénitos nos bebés de pais expostos, bem como outras complicações de saúde com risco de vida.

A morfologia, estrutura, composição e biologia do solo podem ser profundamente alteradas pelas atividades de guerra e a recuperação completa de algumas características pode levar décadas. Algumas funções do solo podem ser definitivamente comprometidas, se não forem implementadas técnicas adequadas de recuperação. Essas técnicas costumam ser extremamente caras, como no caso de contaminação por dioxinas ou radionuclídeos, e a remediação pode até levar à remoção completa do solo poluído e sua substituição por material de solo de outro lugar. Estas conseqüências vão ter impactos nas culturas agrícolas produzidas nessas zonas afetando a produção pecuária (carne, leite e derivados do leite) com efeitos na saúde humana.

Efeitos dos explosivos convencionais e agentes de guerra química

O impacto dos explosivos convencionais e agentes de guerra no solo, podem ser divididos em impactos físicos, químicos e biológicos (Certini et al., 2013), todos com consequências na saúde dos solos por vários séculos após o fim dos conflitos.

As perturbações físicas do solo incluem impermeabilização devido à construção de infraestruturas defensivas, escavação de trincheiras ou túneis, compactação do solo pelo tráfego de maquinaria pesada como carros de combate entre outros veículos, tropas ou crateras causadas por bombas. Os impactos químicos estão relacionados com a libertação de diversos poluentes desde combustíveis, óleos das máquinas, metais pesados, explosivos nitroaromáticos, agentes organofosforados, dioxinas ou elementos radioativos (urânio empobrecido). As alterações biológicas ocorrem como consequências não intencionais do impacto nas propriedades físicas e químicas do solo.

Quando presentes na natureza, os compostos explosivos nitroaromáticos são recalcitrantes à volatilização, hidrólise e biodegradação e, como resultado, podem ser absorvidos pelas plantas ou lixiviados nas águas subterrâneas (Chatterjee et al., 2017). Já os agentes de guerra química podem afetar negativamente a biomassa microbiana como resultado da biodegradação da matéria orgânica (Mitsevich et al., 2000).

No caso das minas terrestres antitanque ou antipessoais, que também poluem o solo ao detonar, a sua permanência no solo e a sua corrosão contribuem para a poluição dos lençóis freáticos (Chendorain et al., 2005). Muitas minas e outras munições vão permanecer depois das guerras (*unexploded ordnance*) vão reduzir a utilização das terras por parte dos agricultores.

Um dos efeitos mais preocupantes são as entradas destes poluentes nas plantas e depois nas cadeias alimentares contribuindo para a contaminação dos alimentos e dos consumidores, com efeitos mais graves nas crianças (Broomandi et al., 2020).

CONCEITO DE “UMA SÓ SAÚDE”

O Homem enfrenta numerosos desafios para alimentar, alojar e dar qualidade de vida à população crescente, aplicando o conceito de desenvolvimento sustentável e dessa forma conservar o ambiente (e vida selvagem, flora e fauna, etc.) para as gerações futuras. A produção de alimentos é um dos principais desafios que teremos que enfrentar no futuro, e temos que abraçar o conceito de “uma só saúde” (*One Health Concept*), tal como representado da Figura 5, e que considera que

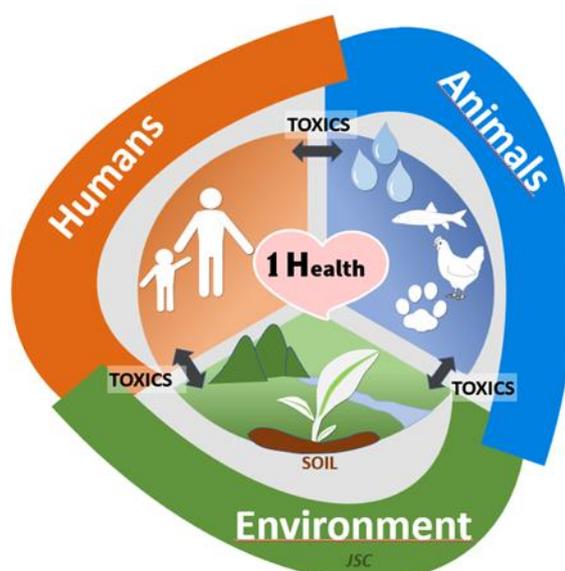


FIGURA 5: Transferência de tóxicos entre ambiente (ar, solo e água), vida selvagem (fauna, flora e alimentos produzidos) e o Homem, como produtor essencial de tóxicos através das suas diversas atividades mas também como principal elemento presente no topo das cadeias alimentares terrestres e aquáticas (Autor: ©JSC - João Soares Carrola).

os ecossistemas estão interligado em termos de saúde, e que a transferência de tóxicos ocorre de forma dinâmica e interligada e que a contaminação por tóxicos, tal como já foi abordado, provoca contaminação das cadeias alimentares com impacto na saúde do Homem. Estes desafios vão ter que ser resolvidos por equipas multidisciplinares.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos são contaminados diariamente com diversos tipos de tóxicos que contribuem para a perturbação da microfauna e fauna edáfica, perda progressiva da sua biodiversidade, contaminação das culturas, contaminação das linhas de água e lençóis freáticos afetando de forma global as redes alimentares. O conhecimento dos efeitos (e mecanismos associados) dos contaminantes no funcionamento dos ecossistemas do solo é fundamental para se poder minimizar a poluição dos solos e assim evitar/prever impactos irreversíveis para preservar a qualidade destes ecossistemas que são fundamentais à sobrevivência da vida selvagem e em particular à vida e bem-estar humano. Importa realçar que necessitamos de solos saudáveis e com vida para produzir e obter alimentos saudáveis, porque mesmo em concentrações muito baixas os tóxicos podem provocar diversas doenças no Homem devido à exposição crónica, com maior risco para os bebés, crianças, mulheres em idade reprodutiva e em particular mulheres grávidas. Por outro lado, não podemos esquecer que a população mundial vai continuar a crescer de forma acelerada até 2050, o que vai contribuir para um aumento da poluição global e das necessidades alimentares, o que pode pôr em causa a segurança alimentar (quantidade e qualidade dos alimentos) juntamente com o impacto das alterações climáticas. A conservação e gestão do solo (e água), redução da poluição, bem como a segurança alimentar serão desafios vitais nas próximas décadas que devem ser mitigados considerando o desenvolvimento sustentável e o conceito de “uma só saúde”, promovendo uma maior colaboração e sensibilização entre académicos, produtores, consumidores e agências governamentais.

agradecimentos • Este trabalho foi apoiado/financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto UIDB/04033/2020 (CITAB/Inov4Agro) e no âmbito do projeto PTDC/CTA-AMB/6686/2020 - ENANTIOTOX - Ecotoxicidade e bioacumulação enantiosseletiva de substâncias psicoativas e DOI 10.54499/PTDC/CTA-AMB/6686/2020 (<http://doi.org/10.54499/PTDC/CTA-AMB/6686/2020>). Ondina Ribeiro agradece às FCT pela bolsa de doutoramento (Ph.D. Grant) 2022.12242.BD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, A., Guo, D., Li, Y., Shaheen, S. M., Wahid, F., Antoniadis, V., Zhang, Z. (2021). *Streptomyces pactum* addition to contaminated mining soils improved soil quality and enhanced metals phytoextraction by wheat in a green remediation trial. *Chemosphere*, 273, 129692. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129692>

Alloway, B. J. (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22): Springer Science & Business Media.

- Balderacchi, M., Filippini, M., Gemitzi, A., Klöve, B., Petitta, M., Trevisan, M., Gargini, A. (2014). Does groundwater protection in Europe require new EU-wide environmental quality standards? *Frontiers in Chemistry*, 2, 32.
- Balseiro-Romero, M., & Baveye, P. C. (2018). Book Review: Soil Pollution: A Hidden Danger Beneath our Feet. In: *Frontiers Media SA*.
- Begum, M., Sarmah, B., Kandali, G. G., Kalita, S., Ojha, I., Bhagawati, R., & Talukdar, L. (2021). Persistent Organic Pollutants in Soil and Its Phytoremediation. In *Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants: IntechOpen*.
- Beltrán, E. M., Pablos, M. V., Torija, C. F., Porcel, M. Á., & González-Doncel, M. (2020). Uptake of atenolol, carbamazepine and triclosan by crops irrigated with reclaimed water in a Mediterranean scenario. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110171.
- Bermúdez, J., & Swarzenski, P. (2021). A microplastic size classification scheme aligned with universal plankton survey methods. *MethodsX*, 8, 101516.
- Bhalsod, G. D., Chuang, Y.-H., Jeon, S., Gui, W., Li, H., Ryser, E. T., . . . Zhang, W. (2018). Uptake and accumulation of pharmaceuticals in overhead-and surface-irrigated greenhouse lettuce. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(4), 822-830.
- Boxall, A. B., Rudd, M. A., Brooks, B. W., Caldwell, D. J., Choi, K., Hickmann, S., . . . Verslycke, T. (2012). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: what are the big questions? *Environmental health perspectives*, 120(9), 1221-1229.
- Briones, M. J. I. (2014). Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 7.
- Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*, 12(21), 9002.
- Burgess, L. C. (2013). Organic pollutants in soil. *Soils and human health*, 83-106.
- Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). Soil and pollution: an introduction to the main issues. In *Soil pollution* (pp. 1-28): Elsevier.
- Carré, F., Caudeville, J., Bonnard, R., Bert, V., Boucard, P., & Ramel, M. (2017). Soil contamination and human health: a major challenge for global soil security. In *Global soil security* (pp. 275-295): Springer.
- Certini, G., Scalenghe, R., & Woods, W. I. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>
- Chalew, T. E., & Halden, R. U. (2009). Environmental exposure of aquatic and terrestrial biota to triclosan and triclocarban. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(1), 4-13.
- Chapman, P. M. (2007). Determining when contamination is pollution — Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environment International*, 33(4), 492-501. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.09.001>
- Chapman, P. M., Wang, F., Janssen, C. R., Goulet, R. R., & Kamunde, C. N. (2003). Conducting ecological risk assessments of inorganic metals and metalloids: current status. *Human and ecological risk assessment*, 9(4), 641-697.
- Chatterjee, S., Deb, U., Datta, S., Walther, C., & Gupta, D. K. (2017). Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation. *Chemosphere*, 184, 438-451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.008>
- Chen, Q. Y., DesMarais, T., & Costa, M. (2019). Metals and Mechanisms of Carcinogenesis. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 59(1), 537-554. doi:10.1146/annurev-pharmtox-010818-021031
- Chendorain, M. D., Stewart, L. D., & Packer, B. (2005). Corrosion of unexploded ordnance in soil- field results. *Environmental science & technology*, 39(8), 2442-2447.
- Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., & Wilson, A. E. (2013). Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge*, 4(4), 10.
- Clemens, S., & Ma, J. F. (2016). Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual review of plant biology*, 67, 489-512.
- Daughton, C. G., & Ternes, T. A. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environmental health perspectives*, 107(suppl 6), 907-938.
- De Filippis, S. P., Abate, V., De Luca, S., Fulgenzi, A. R., Iacovella, N., Iamiceli, A. L., . . . De Felip, E. (2022). Human Exposure to Dioxins and Other Contaminants Following an Accidental Fire at the Fiumicino Airport (Italy): A Public Health Response. *Atmosphere*, 13(12), 2058. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/12/2058>
- de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global change biology*, 24(4), 1405-1416.
- Engwa, G. A., Ferdinand, P. U., Nwalo, F. N., & Unachukwu, M. N. (2019). Mechanism and health effects of heavy metal toxicity in humans. *Poisoning in the modern world-new tricks for an old dog*, 10, 70-90.

- FAO. (2020). *The State of Agricultural Commodity Markets 2020. Agricultural markets and sustainable development: Global value chains, smallholder farmers and digital innovations*. Rome, FAO.
- FAO. (2021). *Global assessment of soil pollution: Report*. FAO and UNEP, Rome, Italy.
- Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. J. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge—The current situation. *Journal of Environmental Management*, 203, 1126-1136.
- Ghanbarizadeh, L., & Nejad, T. S. (2012). Change patterns of agronomy and agricultural lands by war. *Life Sci*, 9(3).
- Godinho, F. N., Segurado, P., Franco, A., Pinheiro, P., Pádua, J., Rivaes, R., & Ramos, P. (2019). Factors related to fish kill events in Mediterranean reservoirs. *Water Research*, 158, 280-290. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.027>
- Gomes, C. A., & Lanceiro, R. T. (2019). Actas do Colóquio “Solos Contaminados, Riscos Invisíveis”. *ICJP/CIDP*, 180-203. doi:[978-989-8722-47-8](https://doi.org/10.1016/j.ics.2019.04.001)
- Grote, U., Craswell, E., & Vlek, P. (2005). Nutrient flows in international trade: Ecology and policy issues. *Environmental Science & Policy*, 8(5), 439-451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.05.001>
- Gu, B., Chen, D., Yang, Y., Vitousek, P., & Zhu, Y.-G. (2021). Soil-Food-Environment-Health Nexus for Sustainable Development. *Research*, 2021. doi:[doi:10.34133/2021/9804807](https://doi.org/10.34133/2021/9804807)
- Gualano, M. R., Bert, F., Mannocci, A., La Torre, G., Zeppego, P., & Siliquini, R. (2014). Consumption of antidepressants in Italy: recent trends and their significance for public health. *Psychiatric Services*, 65(10), 1226-1231.
- Halden, R. U., & Dwyer, D. F. (1997). Biodegradation of dioxin-related compounds: a review. *Bioremediation Journal*, 1(1), 11-25.
- He, G., Lao, Q., Jin, G., Zhu, Q., & Chen, F. (2023). Increasing eutrophication driven by the increase of phosphate discharge in a subtropical bay in the past 30 years. *Frontiers in Marine Science*, 11.
- Helmke, M. F., & Losco, R. L. (2013). Soil's influence on water quality and human health. *Soils and human health*, 155-176.
- Hooda, P. S. (2010). Introduction. In *Trace Elements in Soils* (pp. 1-8).
- How, Z. T., & El-Din, M. G. (2021). A critical review on the detection, occurrence, fate, toxicity, and removal of cannabinoids in the water system and the environment. *Environmental Pollution*, 268, 115642.
- Hubert, B., Rosegrant, M., Van Boekel, M. A., & Ortiz, R. (2010). The future of food: scenarios for 2050. *Crop Science*, 50, S-33-S-50.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., & Alamri, S. A. (2018). Fertilizers and Their Contaminants in Soils, Surface and Groundwater. In D. A. Dellasala & M. I. Goldstein (Eds.), *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 225-240). Oxford: Elsevier.
- Khan, S., Naushad, M., Lima, E. C., Zhang, S., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2021). Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies – A review. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126039. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126039>
- Kim, E.-J., Oh, J.-E., & Chang, Y.-S. (2003). Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil. *Science of The Total Environment*, 311(1), 177-189. doi:[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00095-0)
- Larsen, J. (2008). Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. *EFSA J*, 724, 1-114.
- Leake, J. R., Adam-Bradford, A., & Rigby, J. E. (2009). Health benefits of 'grow your own' food in urban areas: implications for contaminated land risk assessment and risk management? *Environmental Health*, 8(1), 1-6.
- Lee, B. X., Kjaerulf, F., Turner, S., Cohen, L., Donnelly, P. D., Muggah, R., . . . MacGregor, L. S. (2016). Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators. *Journal of public health policy*, 37(1), 13-31.
- Lerda, D., Sanchez, P. L., Szilagyi, S., & Wenzl, T. (2011). Report on the inter-laboratory comparison organised by the European Union Reference Laboratory for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for the validation of a method for quantifying the four EU marker PAHs in Food. Geel, Belgium.
- Liang, L., Zhao, X., Yi, X., Chen, Z., Dong, X., Chen, R., & Shen, R. (2013). Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China. *Soil Use and Management*, 29(2), 161-168.
- Lin, C., Liu, J., Wang, R., Wang, Y., Huang, B., & Pan, X. (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of Kunming, China: concentrations, distribution, sources, and potential risk. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 22(7), 753-766.
- Liwarska-Bizukojc, E. (2022). Phytotoxicity assessment of biodegradable and non-biodegradable plastics using seed germination and early growth tests. *Chemosphere*, 289, 133132.

- Mahmood, I., Imadi, S. R., Shazadi, K., Gul, A., & Hakeem, K. R. (2016). Effects of pesticides on environment. *Plant, soil and microbes: volume 1: implications in crop science*, 253-269.
- Mitsevich, E. V., Mitsevich, I. P., Perelygin, V. V., Lan, D. N., & Hoai, N. T. (2000). Microorganisms as Possible Indicators of General Soil Pollution by Dioxin-Containing Defoliants. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 36(6), 582-588. doi:10.1023/A:1026648623786
- My, T. T. A., Dat, N. D., Van Langenhove, K., Denison, M. S., Long, H. T., & Elskens, M. (2021). Evaluation of the dioxin-like toxicity in soil samples from Thua Thien Hue province using the AhR-CALUX bioassay – An update of Agent Orange contamination in Vietnam. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111971. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111971
- Natal-da-Luz, T., Tidona, S., Jesus, B., Morais, P. V., & Sousa, J. P. (2009). The use of sewage sludge as soil amendment. The need for an ecotoxicological evaluation. *Journal of Soils and Sediments*, 9(3), 246-260. doi:10.1007/s11368-009-0077-x
- Newmark, C. J. (2004). The birth of nerve agent warfare. *Neurology*, 62(9), 1590. doi:10.1212/01.WNL.0000124519.85516.50
- Nhung, N. T. H., Nguyen, X.-T. T., Long, V. D., Wei, Y., & Fujita, T. (2022). A review of soil contaminated with dioxins and biodegradation technologies: current status and future prospects. *Toxics*, 10(6), 278.
- Nielsen, U. N., Wall, D. H., & Six, J. (2015). Soil biodiversity and the environment. *Annual review of environment and resources*, 40, 63-90.
- Nisbet, I. C., & Lagoy, P. K. (1992). Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory toxicology and pharmacology*, 16(3), 290-300.
- Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., & Barrios, E. (2016). *Global soil biodiversity atlas: European Commission*.
- Ounmany, K. (2021). Impacts of Unexploded Ordnance Clearance on Wet Rice Farming in Xieng Khouang Province, Northern Laos. *Journal of Peacebuilding & Development*, 16(3), 372-376. doi:10.1177/1542316621989233
- Palansooriya, K. N., Shaheen, S. M., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Hashimoto, Y., Hou, D., . . . Ok, Y. S. (2020). Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment International*, 134, 105046. doi:https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105046
- Pattnaik, M., Pany, B., Dena, J., Pal, A., & Sahu, G. (2020). Effect of organochlorine pesticides on living organisms and environment. *Chem Sci Rev Lett*, 9, 682-686.
- Pérez, A. P., & Eugenio, N. R. (2018). *Status of local soil contamination in Europe*. Publications Office of the European Union: Brussels, Belgium.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: Intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), 224.
- Ribeiro, O., Briones, M. J., Natal-da-Luz, T., Ribeiro, C. R., Pereira, R., & Carrola, J. S. (2022). As minhocas como engenheiras do solo e sentinelas da poluição. *Revista Captar: Ciência e Ambiente para Todos*, 11, 5-5.
- Rillig, M. C. (2012). *Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?* In: ACS Publications.
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183-191.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). *Soil pollution: a hidden reality: FAO*.
- Sethi, S., & Gupta, P. (2020). *Soil Contamination: A Menace to Life*. In *Soil Contamination: IntechOpen*.
- Silva, M., Sousa, J. R., Ribeiro, O., Ferreira, J., Ribeiro, C., Tiritan, M., . . . Carrola, J. S. (2022). Efeito da cetamina na fauna edáfica: ensaios de fuga e reprodução com *Eisenia fetida*. *Revista de Ciências Agrárias*, 45(4), 587-591.
- Silver, W., Perez, T., Mayer, A., & Jones, A. (2021). The role of soil in the contribution of food and feed. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20200181.
- Stellman, J. M., Stellman, S. D., Christian, R., Weber, T., & Tomasallo, C. (2003). The extent and patterns of usage of Agent Orange and other herbicides in Vietnam. *Nature*, 422(6933), 681-687. doi:10.1038/nature01537
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology*, 133-164.
- Tully, K., & Ryals, R. (2017). Nutrient cycling in agroecosystems: Balancing food and environmental objectives. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(7), 761-798.
- Vale, B. d. C. d., & Haie, N. (2006). Efeitos prejudiciais na saúde humana derivados por ingestão de nitratos na zona vulnerável nº1 (freguesias: Apúlia, Fão) e na zona não vulnerável (freguesias: Fonte Boa, Gandra, Gemeses, Rio Tinto).
- Vergnoux, A., Malleret, L., Asia, L., Doumenq, P., & Theraulaz, F. (2011). Impact of forest fires on PAH level and distribution in soils. *Environmental Research*, 111(2), 193-198. doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.01.008

- Wall, D. H., Nielsen, U. N., & Six, J. (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528(7580), 69-76.
- Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G., & Zhang, P. (2019). Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. *Science of The Total Environment*, 691, 848-857. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209>
- Wang, Q., Shaheen, S. M., Jiang, Y., Li, R., Slaný, M., Abdelrahman, H., . . . Zhang, Z. (2021). Fe/Mn- and P-modified drinking water treatment residuals reduced Cu and Pb phytoavailability and uptake in a mining soil. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123628. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123628>
- Wang, X. (2022). Managing land carrying capacity: key to achieving sustainable production systems for food security. *Land*, 11(4), 484.
- Wu, C., Spongberg, A. L., Witter, J. D., Fang, M., Ames, A., & Czajkowski, K. P. (2010). Detection of pharmaceuticals and personal care products in agricultural soils receiving biosolids application. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 38(3), 230-237.
- Ye, J., Li, J., Wang, P., Ning, Y., Liu, J., Yu, Q., & Bi, X. (2022). Inputs and sources of Pb and other metals in urban area in the post leaded gasoline era. *Environmental Pollution*, 306, 119389. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119389>
- Zacharia, J. T. (2019). Degradation pathways of persistent organic pollutants (POPs) in the environment. *Persistent organic pollutants*, 17-30.