

Impactos sobre o solo e a água subterrânea e recomendações de boas práticas para estandes de tiro

Impacts on soil and groundwater and best practice recommendations for shooting ranges

Marcio Roberto Schneider¹; Ana Claudia Canalli Bortolassi²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina - Brasil, m.schneider@posgrad.ufsc.br

²Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina - Brasil, ana.bortolassi@posgrad.ufsc.br

Recebido:

24 de janeiro de 2025

Recebido no formato de revisão:

26 de fevereiro de 2025

Aceito:

26 de fevereiro de 2025

Disponível online:

09 de abril de 2025

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Contaminação ambiental.
Estandes de tiro.
Metais pesados.
Prevenção.
Resíduos de munição.
Para-balas.
Responsabilidade ambiental.

Keywords:

Environmental contamination.
Shooting ranges.
Heavy metals.
Prevention.
Gunshot residues.
Bullet stop.
Environmental responsibility.

<https://doi.org/10.14295/ras.v39i1.30302>



RESUMO

A contaminação do solo e da água subterrânea por atividades antrópicas é um problema complexo e custoso, especialmente em estandes de tiro, que liberam resíduos de munição que, ao se fragmentarem, podem contaminar o solo e aquíferos. A crescente conscientização sobre a responsabilidade ambiental dos centros de treinamento de tiro exige o desenvolvimento de estratégias para mitigar a poluição e garantir a segurança dos usuários e do meio ambiente. No entanto, as ações de prevenção e controle para esta atividade ainda são limitadas. Estabelecimentos que utilizam para-balas de madeira, pneus e barrancos não cumprem os requisitos de proteção ambiental, potencializando a dispersão de contaminantes, principalmente metais pesados. Os altos custos e o longo tempo para recuperação destas áreas, especialmente quando a água subterrânea foi contaminada, reforçam a importância da prevenção. O objetivo deste trabalho foi chamar a atenção sobre os impactos ambientais associados aos estandes de tiro, particularmente sobre o solo e a água subterrânea, e propor recomendações de boas práticas que visem minimizar esses impactos e melhorar a segurança e sustentabilidade destes empreendimentos.

ABSTRACT

Soil and groundwater contamination caused by anthropogenic activities is a complex and costly issue, particularly in shooting ranges, where ammunition residues, upon fragmenting, can pollute the soil and aquifers. Growing awareness of the environmental responsibility of shooting training centers demands the development of strategies to mitigate this pollution and ensure the safety of users and the environment. However, prevention and control measures for this activity remain limited. Facilities using wooden backstops, tires, and earthen berms fail to comply with safety standards, increasing the dispersion of contaminants in the environment, especially heavy metals. The high costs and lengthy recovery times for these areas, particularly when groundwater contamination occurs, underscore the importance of prevention. This study aims to highlight the environmental impacts associated with shooting ranges, particularly on soil and groundwater, and propose best practice recommendations to mitigate these impacts and improve the safety and sustainability of these facilities.

INTRODUÇÃO

A contaminação do solo e das águas subterrâneas é um problema global complexo, com milhões de hectares afetados por substâncias tóxicas antropogênicas, como metais pesados e resíduos industriais, resultando em impactos à biodiversidade, segurança alimentar e à saúde humana (Li *et al.*, 2021). Estima-se que 1 milhão de pessoas morrem anualmente devido ao envenenamento por chumbo (OMS, 2022), agravado pela lenta degradação dos contaminantes e sua dispersão, afetando o solo e os recursos hídricos subterrâneos. Um exemplo de empreendimentos geradores de contaminação por metais pesados, por vezes despercebidos ou negligenciados, são os estandes de tiro, os quais possuem elevado potencial para liberação de metais pesados no ambiente, como chumbo, antimônio, cobre e zinco.

Embora sejam projetados para garantir a segurança na prática de tiro, esses locais frequentemente apresentam concentrações elevadas desses metais, com riscos ambientais significativos (Zhu *et al.*, 2024). Um estudo brasileiro revelou que policiais militares estão expostos a altos níveis de chumbo provenientes dos treinamentos com armas de fogo (Souza *et al.*, 2015).

A munição utilizada em armas de fogo, composta principalmente por chumbo (90-95%) com uma pequena quantidade de antimônio e um invólucro de cobre (cápsula), possui elevado potencial para contaminação do solo e aquíferos. Esse potencial é influenciado pela hidrogeologia, geoquímica e microbiologia de cada local, por exemplo: composição mineralógica e iônica, permeabilidade do solo associada à pluviosidade do local, pH, equilíbrio entre as espécies do sistema carbonato (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) e a concentração de CO_2 dissolvido e o potencial de oxidação e redução, etc. Christou *et al.* (2022) observaram que os níveis de chumbo no solo de estandes de tiro variam de 791 mg/kg a 7.265 mg/kg, valores dezenas ou centenas de vezes superiores aos definidos pela Organização Mundial da Saúde (100 mg/kg). Nos Estados Unidos, estima-se que 70.000 toneladas de chumbo sejam adicionadas anualmente ao solo dos estandes (Mariussen *et al.*, 2012). A chuva e outros agentes podem transportar metais pesados para corpos d'água próximos, ampliando a contaminação. A magnitude do problema pode ser estimada considerando a estimativa da existência de 100.000 estandes de tiro no mundo, resultando em uma liberação anual de até 72.600 toneladas de Pb de munições nos solos desses diversos campos nacionais (Rodríguez-Seijo *et al.*, 2016).

A gestão de resíduos nos estandes de tiro convencionais é complexa, com o acúmulo de fragmentos de munição e materiais contaminados, o que inclui as áreas de contenção como fontes de poluição (Kajander & Parri, 2014). Para mitigar esses problemas, é essencial seguir normas de segurança e regulamentações ambientais, a exemplo da coleta e reciclagem de resíduos de chumbo nos Estados Unidos (EPA, 2005). No Brasil, há uma carência de normativas específicas sobre esse tema, evidenciando a necessidade de legislações mais abrangentes.

Este trabalho tem como principal objetivo destacar os impactos ambientais relacionados aos estandes de tiro, com ênfase na contaminação do solo e da água subterrânea, além de apresentar recomendações de boas práticas voltadas à minimização desses impactos. Busca-se, assim, promover a segurança ambiental e ocupacional, além de contribuir para a sustentabilidade e a conformidade ambiental desses empreendimentos. De acordo com o Ministério da Justiça e Segurança Pública (Brasil, 2023), os estandes de tiro são os "locais destinados ao manuseio, treinamentos e disparos reais de armas de fogo, de modo seguro, com um anteparo, popularmente chamado de para balas, capaz de deter os projéteis, e que não ofereça riscos à incolumidade pública". Os estandes de tiro no Brasil são regulamentados pelo Exército Brasileiro, por meio do Sistema de Gerenciamento Militar de Armas (SIGMA), que estabelece normas para licenciamento, segurança e operação. O Instituto Sou Da Paz (2023) apontou a existência de 2.070 clubes e estandes com registros ativos, os quais podem ser *indoor* (fechados) ou *outdoor* (abertos), com padrões construtivos que incluem barreiras de contenção de projéteis, distâncias mínimas de segurança e sistemas de ventilação (no caso dos *indoor*). A padronização é essencial para garantir a segurança de praticantes e evitar impactos ambientais, como a contaminação por chumbo. Apesar do governo ter revisado as políticas e implementado novas regulamentações para tentar equilibrar o direito dos CACs (Colecionador, Atirador Desportivo e Caçador) com a necessidade de garantir a segurança da população, a fiscalização, porém, enfrenta desafios devido à falta de recursos e à dispersão geográfica desses estabelecimentos.

RISCOS AMBIENTAIS E À SAÚDE HUMANA EM ESTANDES DE TIRO

A percepção dos riscos é essencial para compreender a contaminação ambiental e os danos à saúde humana em estandes de tiro. Esse entendimento está relacionado ao conhecimento sobre a exposição a contaminantes e suas consequências (Harclerode *et al.*, 2016). A segurança dos usuários e a proteção ambiental dependem do controle de partículas e vapores de metais pesados liberados durante os disparos, como chumbo (Pb), cádmio (Cd), alumínio (Al), cromo (Cr), antimônio (Sb) e bário (Ba) (Chemello, 2007). Cada elemento apresenta riscos específicos: o chumbo está associado a distúrbios neurológicos e danos renais (Ni *et al.*, 2023); o cádmio aumenta a incidência de câncer (Tabelin *et al.*, 2018); o antimônio afeta os sistemas respiratório e cardiovascular; o cromo prejudica o sistema respiratório e a pele; e o bário pode causar problemas cardíacos e digestivos (Okkenhaug *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2023).

O chumbo, amplamente utilizado em projéteis por sua alta densidade, é uma das principais fontes de contaminação ambiental em estandes de tiro, acumulando-se no solo, podendo migrar para águas subterrâneas. Em condições de pH inferior a 4 e superior a 9, estes impactos podem ser ainda mais severos à biodiversidade e à saúde humana, como demonstrado em análises realizadas pela Polícia Militar do Paraná (PMPR) e estudos internacionais (Souza, 2016; CDC, 2024). Adicionado ao chumbo para melhorar a moldagem dos projéteis, o antimônio apresenta alta mobilidade no solo, atingindo concentrações muito acima dos níveis naturais, além de gerar partículas inaláveis em ambientes fechados, exigindo medidas de mitigação como fitorremediação (Fahrenhorst; Renger, 1990; Sanderson *et al.*, 2018). Já o cádmio, utilizado por suas propriedades anticorrosivas, é altamente tóxico, acumulando-se em órgãos humanos e impactando futuras gerações, além de afetar a germinação e o crescimento das plantas, agravando os riscos ambientais devido à sua alta solubilidade e biodisponibilidade (Fløtre *et al.*, 2017; Sharma; Sachdeva, 2015).

Além dos riscos químicos, os estandes de tiro podem gerar poluição sonora, prejudicando usuários, fauna e comunidades vizinhas. As tecnologias de barreiras acústicas e filtragem de resíduos são essenciais para mitigar esses impactos. As medidas como o monitoramento contínuo e a identificação de áreas vulneráveis, aliadas ao cumprimento das regulamentações ambientais, asseguram a operação sustentável dos estandes. Investir em pesquisa e soluções inovadoras não apenas reduz os riscos à saúde e ao meio ambiente, mas também promove responsabilidade ambiental e segurança nos estandes de tiro.

TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO EM ESTANDES DE TIRO

As tecnologias de remediação em estandes de tiro têm como objetivo reduzir ou eliminar a contaminação por metais pesados no solo e na água subterrânea, possibilitando o uso seguro e sustentável dessas áreas. A escolha da técnica depende de fatores como níveis de concentrações, extensão da contaminação, riscos ao meio ambiente e à saúde humana, tempo necessário e custos associados. A remediação do solo, especialmente em áreas de uso intensivo, requer tecnologias de alta complexidade que nem sempre garantem resultados imediatos, com processos como a extração de metais e a recuperação de aquíferos podendo durar anos (Sánchez-Castro *et al.*, 2023). Além disso, as operações de remediação precisam considerar a inviabilidade do uso do local durante o tratamento, tornando a prevenção e o uso de estandes de tiro modernos essenciais para a mitigação do problema a longo prazo.

Para solos contaminados por metais como o chumbo, a remoção controlada e segura é uma técnica amplamente empregada. Esse método envolve a escavação cuidadosa do solo contaminado e seu transporte para locais de tratamento especializado, uma abordagem que exige altos investimentos, exemplificada pelo caso da Finlândia, onde o orçamento para remediação de cerca de 400 locais chega a 50–70 milhões de euros por ano (Sorvari *et al.*, 2009). Na estabilização ou tratamento químico, os reagentes adicionados aos solos contaminados formam compostos menos solúveis enquanto controlam o pH em uma faixa de solubilidade mínima (ITRC, 2003). Como formam compostos menos solúveis, os resíduos estabilizados são frequentemente considerados mais protetores das águas subterrâneas. Em estandes de tiro a céu aberto, coberturas de superfície removíveis são alternativas eficazes para reduzir a contaminação por erosão e lixiviação, especialmente durante períodos de inatividade (EPA, 2005). Essas coberturas, feitas de materiais impermeáveis como o plástico, limitam a dispersão de contaminantes para o ambiente ao bloquear o contato com agentes erosivos naturais.

Soluções tecnológicas de remediação, como as barreiras reativas, são eficazes para conter a migração de poluentes, especialmente em águas subterrâneas. Elas consistem em barreiras construídas no subsolo, que interceptam o fluxo de água contaminada e reagem quimicamente, fisicamente ou biologicamente com os poluentes para transformá-los em compostos menos nocivos ou retê-los na própria barreira. Essa abordagem é amplamente empregada em áreas onde a contaminação por metais pesados e outras substâncias tóxicas apresenta riscos de dispersão (Han *et al.*, 2016). Em estandes de tiro, as barreiras reativas são opções promissoras para evitar que contaminantes, como o chumbo, se propaguem, reduzindo o risco de contaminação do lençol freático. Um exemplo comum são as barreiras de ferro zero-valente, que atuam por meio da redução e precipitação de metais pesados, ou barreiras compostas por materiais absorventes que retêm os contaminantes no local (Korte, 2001). Incluir barreiras reativas em estratégias de remediação em estandes de tiro pode ser uma alternativa eficaz e sustentável, especialmente quando combinadas com outras técnicas de monitoramento e contenção de contaminantes.

A injeção de reagentes neutralizantes representa uma estratégia significativa de remediação em estandes de tiro, especialmente quando integrada a outras técnicas, como barreiras reativas e métodos de extração de contaminantes. Essa abordagem permite a neutralização rápida de contaminantes, melhorando as condições do solo e reduzindo a mobilidade de metais pesados, como o chumbo. De acordo com a *Best Management Practices for Lead at Outdoor Shooting Ranges* (BMP), é recomendado que o pH seja avaliado anualmente (EPA, 2005). Além disso, a aplicação localizada dos reagentes minimiza a perturbação ambiental, tornando-a uma opção prática e de baixo custo operacional. No entanto, é essencial considerar suas desvantagens, como os riscos de reações indesejadas e a necessidade de monitoramento contínuo para garantir a eficácia ao longo do tempo. Portanto, a combinação da injeção de reagentes com barreiras reativas e métodos de extração pode oferecer uma solução abrangente para mitigar a contaminação em estandes de tiro, abordando tanto as fontes de poluição quanto a proteção dos recursos hídricos.

Entre as abordagens naturais para mitigar a contaminação por metais pesados em estandes de tiro, a fitorremediação tem se mostrado uma alternativa promissora (Tan *et al.*, 2023). Essa técnica utiliza plantas para remover, degradar ou imobilizar o chumbo presente no solo. Essas plantas fitorremediadoras têm a capacidade de acumular o chumbo nas suas estruturas, como raízes, caules e folhas (Sharma *et al.*, 2023). Turpeinen *et al.* (2000) estudaram a fitoestabilização do chumbo na madeira de pinheiro finlandesa e verificaram que os pinheiros são capazes de ligar 30% do chumbo do solo com suas raízes. No geral, a fitorremediação é um método de remediação barato, mas pode ser um processo demorado dependendo da região por conta do período de crescimento anual, sendo necessário um planejamento adequado e a escolha das espécies vegetais corretas, que apresentem maior capacidade de acumular o chumbo no solo.

Cada uma dessas técnicas possui aplicações específicas, limitadas por fatores como o tipo de contaminação, profundidade e natureza do solo. A extração de metais em áreas contaminadas é uma atividade tecnologicamente complexa e apresenta desafios ainda maiores quando há contaminação de aquíferos, pois a remediação exige um período prolongado que inviabiliza o uso da área afetada. No entanto, os custos elevados da remediação dessas áreas representam um grande desafio financeiro, alcançando valores de centenas a milhares de reais, dependendo da extensão e gravidade da contaminação. Dada a elevada complexidade e os custos de remediação, torna-se essencial priorizar ações preventivas para mitigar a poluição do solo em estandes de tiro, garantindo a segurança e sustentabilidade desses locais.

REGULAMENTAÇÃO DE ESTANDES DE TIRO

A regulamentação dos estandes de tiro no Brasil ainda carece de padronização específica, especialmente em relação à proteção ambiental. A Lei 6.938/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente) e a Lei 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) estabelecem diretrizes gerais para o controle de atividades poluidoras e áreas contaminadas, mas não tratam diretamente das operações em estandes de tiro. A Resolução CONAMA nº 237/1997 regula atividades potencialmente poluidoras, porém não define critérios específicos sobre a localização de estandes em relação a áreas sensíveis, como Áreas de Proteção Permanente (APPs) e corpos d'água. Os estandes de tiro deveriam obter licenças ambientais junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) ou órgãos estaduais, porém ainda não há uma parametrização normativa nacional.

Segundo o Ministério da Justiça e Segurança Pública (2023), as estruturas de treinamento são construídas de maneira empírica, sem critérios padronizados para o tamanho, calibres suportados ou descarte de resíduos. No Paraná, a Lei nº 16.575, que rege a Polícia Militar, também não oferece diretrizes sobre o gerenciamento ambiental de estandes de tiro. A Resolução CONAMA nº 420/2009 define critérios para o manejo de áreas contaminadas, incluindo limites de metais pesados no solo e na água, como chumbo (300 mg/kg no solo e 10 µg/L na água subterrânea). Já a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece padrões de qualidade para diferentes tipos de água, incluindo limites de chumbo. A NR-7 define 40 µg/dL como referência para chumbo no sangue de populações não expostas e 60 µg/dL como limite máximo ocupacional. Apesar dessas normas, faltam regulamentações específicas para prevenir a contaminação ambiental e garantir práticas sustentáveis nos estandes de tiro, deixando lacunas no controle da poluição e no manejo adequado dos resíduos.

Em contrapartida, o cenário internacional apresenta exemplos mais avançados de regulamentação. Nos Estados Unidos, a *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), implementada pela *Environmental Protection Agency* (EPA), estabelece diretrizes para o gerenciamento de resíduos perigosos, incluindo o chumbo deixado nos estandes de tiro, demandando planos de manejo para evitar a contaminação do solo e da água. No entanto, esse chumbo deixado no ambiente, está sujeito à definição mais ampla de resíduos sólidos redigidos pelo Congresso e são utilizados nas seções 7.002 e 7.003 do estatuto RCRA. O manual *Melhores práticas de gestão para o chumbo em estandes de tiro ao ar livre* (*Best Management Practices for Lead at Outdoor Shooting Ranges - BMP*) tem como objetivo fornecer informações gerais úteis aos proprietários/operadores de estandes de tiro. Este guia foi desenvolvido pela EPA - Region 2 em cooperação com alguns estados, bem como muitos setores da EPA. Segundo a EPA, o valor de referência para o chumbo em áreas residenciais é de 400 mg/kg de solo e em água subterrânea de 15 µg/L. O valor de 30 µg/dL de sangue é o valor de referência recomendado pela *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH®) para trabalhadores expostos ao Pb. A Administração de segurança e saúde ocupacional (*Occupational Safety & Health Administration - OSHA*) faz parte do Departamento do trabalho dos Estados Unidos (United States Department of Labor) e é a instituição responsável por criar e fazer cumprir as normas de segurança e saúde no trabalho nos Estados Unidos. O limite de exposição permissível (PEL) para o ruído é de 90 dBA, e é adotado fator de troca 5. O Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional (*National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH*) é o órgão responsável pela realização de pesquisas e elaboração de recomendações para a prevenção de doenças e acidentes de trabalho nos Estados Unidos. O NIOSH recomenda níveis de ruído no local de trabalho abaixo de 85 dBA para uma jornada de trabalho de oito horas e adota o fator de troca 3. Com relação à contaminação ambiental, o manual BMP é um importante programa para monitorar e ajustar o pH do solo, pois pode ter efeito na migração do chumbo. Os solos com baixos valores de pH (ou seja, condições ácidas) são particularmente preocupantes, pois a mobilidade do chumbo aumenta em condições ácidas, uma vez que a acidez dos solos contribui para a quebra do chumbo. O valor ideal de pH do solo nos estandes de tiro está entre 6,5 e 8,5. Este BMP é importante porque muitos solos no leste dos Estados Unidos têm valores de pH inferiores a 6,2 (NISSF, 1997).

Na União Europeia, vários países adotaram regulamentações mais rigorosas para o controle de poluição por metais pesados. O valor de 35 µg/dL é considerado como referência para a população em geral, não exposta ocupacionalmente ao Pb. A Diretiva-Quadro da Água (2000/60/EC), por exemplo, estabelece metas rigorosas para a proteção das águas superficiais e subterrâneas, impondo limites estritos para a concentração de substâncias perigosas, como o chumbo (10 µg/L) e o cádmio (5 µg/L) (Europa, 2000). A preocupação com a poluição por esses contaminantes em estandes de tiro é abordada tanto por regulamentos ambientais gerais quanto por normas específicas para a gestão de resíduos perigosos. Essa diretiva obriga os operadores de atividades potencialmente poluidoras, como os estandes de tiro, a adotar medidas para evitar a contaminação dos recursos hídricos. Além disso, a Diretiva de Resíduos (2008/98/EC) estabelece uma hierarquia de gestão de resíduos que incentiva a prevenção, a reciclagem e o tratamento adequado de resíduos perigosos (Europa, 2008). Nos estandes de tiro, isso se traduz em exigências para a coleta e tratamento de projéteis de chumbo e outros metais pesados.

Alguns países da União Europeia, como a Alemanha, já exigem que os estandes de tiro implementem sistemas de captação e remoção periódica de chumbo para minimizar o impacto ambiental. Um exemplo de regulamentação específica na Alemanha é o Regulamento Federal de Resíduos (*Kreislaufwirtschaftsgesetz*), que se aplica diretamente às atividades de tiro ao alvo (Alemanha, 2012). Este regulamento exige que os operadores de estandes adotem práticas de gestão ambiental, incluindo a instalação de barreiras de contenção de projéteis, remoção e

reciclagem de metais pesados, e monitoramento contínuo da qualidade do solo e da água. Essa legislação promove a economia circular, incentivando a recuperação de materiais usados e prevenindo a poluição de longo prazo. Além disso, há uma forte ênfase no uso de tecnologias de remediação, como a fitorremediação e a estabilização química de solos contaminados, para garantir que o impacto ambiental seja minimizado. A Lei Federal de Controle de Emissões (Bundesimmissionsschutzgesetz) regula as emissões de poluentes no ar, incluindo as provenientes de estandes de tiro. Ela define limites rigorosos para a concentração de metais pesados no ar interno dos estandes de tiro fechados, obrigando o uso de tecnologias de filtragem e ventilação adequadas.

Esses exemplos internacionais destacam a necessidade urgente de adotar regulamentações mais precisas no Brasil para os estandes de tiro. A implementação de normas que exijam planos de gerenciamento de resíduos sólidos, a substituição de munições tóxicas e a instalação de sistemas de contenção de projéteis seria um passo fundamental para mitigar os impactos ambientais dessas instalações. O cumprimento dessas diretrizes pode exigir que os operadores de estandes adotem práticas de gerenciamento ambiental, como Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), avaliação de possíveis impactos, medidas mitigadoras, sistemas de contenção de metais pesados e planos de monitoramento ambiental. Além disso, elaborar Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), para garantir a correta gestão dos resíduos produzidos, como cápsulas de munição e resíduos químicos. Portanto, a regulamentação nacional deve evoluir, integrando lições aprendidas em outros países e aplicá-las ao contexto brasileiro, com o objetivo de garantir a sustentabilidade dos estandes de tiro e a preservação ambiental.

BOAS PRÁTICAS EM ESTANDES DE TIRO

A As soluções tecnológicas para estandes de tiro são fundamentais para minimizar os impactos ambientais e garantir operações mais seguras e sustentáveis. No Brasil, há estandes de tiro ao ar livre considerados insalubres, potencialmente contaminantes e propensos a falhas de segurança, porém há um arcabouço normativo no Brasil sobre a regulamentação desses locais que não são seguidos. A Norma Brasileira ABNT NBR 15000-2:2020 especifica os requisitos e métodos de ensaio para os materiais planos opacos e/ou transparentes, destinados a oferecer proteção balística. O Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019 – “Novo R-105” cita a necessidade de a segurança operacional do estande ser garantida por engenheiro inscrito no CREA. A Portaria DPC - 3, de 2 de julho de 2008 (Polícia Civil do Estado de São Paulo) aponta a necessidade da empresa que fornece o estande possuir Alvará e Certificado emitido pela Divisão de Produtos Controlados. Alguns estandes frequentemente utilizam para-balas feito de madeira, pneus e barrancos de terra que, apesar de serem soluções econômicas, apresentam sérios riscos de segurança, incêndio e contaminação. A madeira é um material altamente inflamável e a combinação de faíscas e calor gerados pelo disparo de munições pode, facilmente, iniciar focos de fogo, especialmente em áreas secas ou mal ventiladas. O acúmulo de metais pesados (como chumbo), nesses “para-balas” de materiais orgânicos ou reciclados, pode resultar em poluição do solo e da água já que não há mecanismos apropriados de contenção ou filtragem de substâncias tóxicas. Isso reforça a necessidade de utilizar materiais modernos, que sejam mais seguros e resistentes ao fogo, nos estandes de tiro atuais.

O desenvolvimento de estandes de tiro modernos incorpora tecnologias avançadas que visam reduzir a contaminação e melhorar o gerenciamento de resíduos, com foco em segurança, saúde ocupacional e sustentabilidade ambiental. Entre as principais inovações estão os sistemas de contenção de resíduos e a reciclagem de munição e materiais, que impedem a dispersão de metais pesados no solo e promovem a sustentabilidade e a economia circular dentro da operação do campo de tiro. Os para-balas em aço balístico em formato de funil de aço param os projéteis por um processo de impacto, redirecionando-os a uma câmara de desaceleração que termina em um compartimento que retém os projéteis e permite a sua imediata coleta. Neste modelo, como a munição se fragmenta durante o processo de parada, é indispensável a utilização de um aspirador dedicado para sugar os pequenos fragmentos gerados, garantindo a eficiência no gerenciamento de resíduos. Já no modelo de para-balas que utiliza uma caixa retentora com defletores balísticos e camadas de mídias de elastômero, a munição passa por um processo de frenagem. Nesse sistema, os projéteis ficam armazenados dentro da caixa e, após a sua saturação (quando atinge a capacidade máxima de armazenamento), a mídia deve ser esvaziada, separando a munição dos fragmentos de borracha. Os para-balas elastoméricos, além de capturar os projéteis com eficiência, oferecem excelente desempenho em termos de eficiência acústica, contribuindo para a redução dos níveis

de ruído durante os treinamentos. Ambos os modelos de para-balas permitem a coleta eficiente e a destinação adequada dos projéteis, promovendo a economia circular. O material coletado é reciclado e transformado em novos produtos. O chumbo reciclado pode ser reutilizado na fabricação de novas munições ou em indústrias de materiais pesados, reduzindo a demanda por extração de novos materiais e o impacto ambiental causado pela mineração. O uso de contêineres para modelagem básica, como nas soluções adotadas pela Polícia Rodoviária Federal, pode ser uma alternativa de menor custo para a implementação de estandes mais modernos em instituições de segurança pública, quando comparado a opções em alvenaria ou estruturas pré-moldadas (Brasil, 2023). Uma outra alternativa de estandes de tiro modernos são os sistemas de ventilação e filtragem de ar para capturar partículas de metais pesados, especialmente em estandes internos, prevenindo que esses contaminantes sejam inalados ou liberados no ambiente. Esses sistemas, que podem ser tanto naturais quanto forçados, garantem uma circulação constante do ar, reduzindo a concentração de poluentes nocivos. Os estandes equipados com filtros HEPA de múltiplos estágios, são capazes de remover até 99,97% das partículas, incluindo poeira e resíduos de pólvora, assegurando que o ar respirado pelos atiradores e pelo pessoal de apoio esteja livre de toxinas (NSSF, 2017). Além disso, muitos estandes integram monitoramento contínuo da qualidade do ar, ajustando automaticamente a ventilação para manter os padrões de segurança, facilitando a gestão sustentável dos estandes de tiro. Essa abordagem não apenas previne o acúmulo de gases tóxicos, como o dióxido de carbono, mas também contribui para a conformidade com as normas de segurança e saúde ocupacional, como as estabelecidas pela OSHA e pela NIOSH. Ao promover um ambiente de treinamento mais seguro, esses sistemas são fundamentais para a proteção da saúde a longo prazo dos usuários, minimizando o risco de doenças respiratórias e outros problemas associados à exposição a metais pesados.

A adoção de munições fabricadas com materiais não-tóxicos, como cobre ou aço em vez de chumbo, pode reduzir drasticamente a contaminação ambiental, prevenindo a poluição do solo e da água, que é frequentemente causada pela degradação do chumbo. Além de beneficiar o meio ambiente, essas munições também protegem a saúde dos atiradores e do pessoal dos estandes de tiro, reduzindo a exposição a toxinas nocivas, como o saturnismo. O incentivo ao desenvolvimento de munições biodegradáveis representa uma inovação significativa, pois essas munições são projetadas para se decompor naturalmente, minimizando o impacto ecológico. As regulamentações em várias regiões já incentivam o uso de munições não-tóxicas, especialmente em áreas ambientalmente sensíveis, refletindo um movimento crescente em direção à sustentabilidade.

Essa combinação de regulamentações ambientais rigorosas, avanços tecnológicos e práticas sustentáveis faz com que os estandes de tiro modernos na Alemanha sirvam como modelo de responsabilidade ambiental e inovação. A legislação alemã exige que estandes de tiro realizem análises periódicas para detectar concentrações de chumbo, antimônio e outros metais pesados. Se forem encontrados níveis elevados de contaminação, medidas corretivas, como a escavação e remoção do solo contaminado, devem ser implementadas imediatamente. Seguindo regulamentações e incentivos ambientais, muitos estandes na Alemanha estão migrando para o uso de munições sem chumbo, substituído por cobre e aço. Essas alternativas são menos tóxicas e reduzem significativamente o risco de contaminação do solo e da água. Em algumas regiões, essa transição é fortemente incentivada por programas de subsídios governamentais. O design dos estandes de tiro modernos também leva em conta práticas de construção sustentável, como o uso de materiais recicláveis e a adoção de tecnologias verdes, como a instalação de sistemas de energia solar para alimentar a infraestrutura do local. A drenagem eficiente também é uma prioridade, garantindo que a água da chuva não espalhe contaminantes para os lençóis freáticos ou corpos d'água próximos.

A implementação de práticas sustentáveis em estandes de tiro pode ser amplamente incentivada por políticas públicas que combinem subsídios, incentivos fiscais e regulação ambiental mais rigorosa. Os subsídios governamentais e reduções tributárias poderiam apoiar a modernização dessas instalações, promovendo o uso de tecnologias como sistemas de ventilação e reciclagem de resíduos. Além disso, parcerias estratégicas com fabricantes de munições, empresas de engenharia ambiental e instituições de pesquisa poderiam fomentar o desenvolvimento de inovações, como munições biodegradáveis e métodos avançados de contenção de resíduos. Os programas de certificação, como um selo de sustentabilidade, destacariam os estandes que adotem práticas alinhadas às normas ambientais e de segurança, enquanto campanhas de conscientização e treinamentos capacitarão gestores e usuários sobre os benefícios de tecnologias limpas. O envolvimento de órgãos públicos, setor privado e academia é essencial para transformar os estandes de tiro em modelos de segurança e responsabilidade ambiental, promovendo um impacto positivo no meio ambiente e na saúde ocupacional.

5. CONCLUSÃO

Com base na revisão da literatura nacional e internacional, este trabalho apresentou os potenciais impactos ambientais sobre o solo e água subterrânea em estandes de tiro, evidenciando os desafios associados a essa atividade. De forma unânime, os estudos sobre o tema demonstraram que os principais riscos estão associados à exposição humana e ecológica ao solo e água subterrânea contaminados por metais pesados, principalmente o chumbo. Em função da concentração e duração da exposição aos contaminantes, esses podem ocasionar diversas doenças e impactos ambientais, determinando a necessidade de um controle rigoroso e contínuo, com foco na prevenção da contaminação. No contexto brasileiro, embora existam diretrizes relacionadas aos níveis aceitáveis de substâncias químicas no solo e na água subterrânea, a regulamentação dos estandes de tiro, visando à prevenção de impactos da atividade, ainda carece de padronização. Em contraponto, o cenário internacional apresenta diversos exemplos de regulamentações, as quais poderiam ser consultadas, inclusive como referência para a implementação de novas diretrizes brasileiras. Embora algumas técnicas de remediação sejam viáveis para esses locais, os custos são elevados, podendo inviabilizar os empreendimentos enquanto a remediação não for completada. Portanto, é imperativo a adoção de práticas preventivas para minimizar os impactos ambientais e à saúde humana decorrentes da prática de tiro em estandes de tiro. Diante desse cenário, estandes de tiro modernos emergem como soluções viáveis e sustentáveis, uma vez que empregam tecnologias como sistemas de contenção e reciclagem de projéteis, ventilação com filtragem de ar para a retenção de partículas nocivas. Esses avanços tecnológicos e estruturais promovem a prevenção e mitigação dos efeitos contaminantes de forma antecipada, reduzindo não apenas a necessidade de intervenções corretivas, mas também os impactos cumulativos ao longo do tempo, enquanto aumentam de maneira duradoura a segurança e a salubridade dos ambientes de treinamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMANHA. *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5771/9783802956317-663>
- BRASIL. *Aperfeiçoamento e padronização da instrução de tiro por forças policiais - estandes de tiro - regulamentação e aspectos construtivos*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mj/pt-br/assuntos/sua-seguranca/seguranca-publica/pro-seguranca/guias-e-estudos-tecnicos/guia-estandes-de-tiro.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- CDC. Lead (Pb) Poisoning. [s. d.]. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1037/e411502005-001>
- CHEMELLO, E. *Ciência Forense: balística*. Química Virtual. p. 1-9, 2007.
- CHRISTOU, A.; DALIAS, P.; DEMETRIOU, E.; CHRISTOFIDOU, M.; KOZAKOU, S.; MICHAEL, N.; CHARALAMBOUS, C.; HATZIGEORGIOU, M.; CHRISTOU, E.; STEFANI, D.; CHRISTOFOROU, E.; NEOCLEOUS, D. Lead contamination of soils, sediments, and vegetation in a shooting range and adjacent terrestrial and aquatic ecosystems: A holistic approach for evaluating potential risks. *Chemosphere*, v. 292, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133424>
- SOUZA, V. *Avaliação da contaminação do solo por metais tóxicos (cádmio, cromo, chumbo e alumínio) em estandes de tiro no estado do Paraná/Brasil*. Tese (Doutorado em Ambiente e Desenvolvimento) - Centro Universitário UNIVATES. Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2016. DOI: <https://doi.org/10.29381/0103-8559/2020300182-6>
- SOUZA, V.; KONRAD, O.; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Exposição por chumbo dos profissionais de segurança pública na região de Cascavel-PR. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, n. 4, p. 47-53, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v10i4.3626>
- ESTADOS UNIDOS. *National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH*. About NIOSH. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/index.html>. Acesso em: 23 out. 2024.
- ESTADOS UNIDOS. *Occupational Safety and Health Standards - OSHA*. About OSHA. Disponível em: <https://www.osha.gov/>. Acesso em: 23 out. 2024.
- EUROPA. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511610851.056>
- EUROPA. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511610851.056>

- FAHRENHORST, C.; RENGGER, M. The effects of very large amounts of lead, antimony and arsenic in agricultural soils in the vicinity of shooting ranges. *Journal article: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten*, n. 32, p. 827-830, 1990. Disponível em: <https://www.vdlufa.de/>. Acesso em: 17 dez. 2024
- FLØTRE, C. H.; VARSI, K.; HELM, T.; BOLANN, B.; BJØRKE-MONSEN, A. Predictors of mercury, lead, cadmium and antimony status in Norwegian never-pregnant women of fertile age. *PLoS ONE*, v. 12, n. 12, p. e0189169, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189169>
- HARCLERODE, M. A.; LAL, P.; VEDWAN, N.; WOLDE, B.; MILLER, M. E. Evaluation of the role of risk perception in stakeholder engagement to prevent lead exposure in an urban setting. *Journal of Environmental Management*, v. 184, p.132-142, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.045>
- KAJANDER, S.; PARRI, A. Management of the environmental impact of shooting ranges. *Best Available Techniques, The Finnish Environment*, v. 4, 2014. Disponível em: <https://ym.fi/julkaisut>. Acesso em: 21 out. 2024.
- INSTITUTO SOU DA PAZ. *Dados de clubes de tiro no Brasil via Lei de Acesso à Informação – 2023*. [S. l.]: Instituto Sou da Paz, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-0695.2017v12n1.33788>
- ITRC. *Characterization and Remediation of Soils at Closed Small Arms Firing Ranges*. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, 2003. Disponível em: <https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2024/09/SMART-1.pdf>. Acesso em: 21 out. 2024.
- KORTE, N. E. *Zero-Valent Iron Permeable Reactive Barriers: A Review of Performance*. United States, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2172/814389>
- LI, P.; KARUNANIDHI, D.; SUBRAMANI, T.; SRINIVASAMOORTHY, K. Sources and Consequences of Groundwater Contamination. *Archives of environmental contamination and toxicology*, v. 80, n. 1, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00805-z>
- MARIUSSEN, E.; LJØNES, M.; STRØMSENG, A. Use of sorbents for purification of lead, copper and antimony in runoff water from small arms shooting ranges. *Journal of Hazardous Materials*, v. 243, p. 95-104, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.005>
- NI, S.; RAHMAN, S.; KASAI, S.; YOSHIOKA, S.; WONG, K. H.; MASHIO, A. S.; HASEGAWA, H. Remediation of lead-contaminated shooting range soil: Biodegradable chelator-assisted washing and subsequent post-treatment using FeCl and CaO. *Environmental Technology & Innovation*, v. 31, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103172>
- NSSF. *Environmental Aspects of Construction and Management of Outdoor Shooting Ranges*. 1997. 139 p. Disponível em: <https://www.nssf.org/>. Acesso em: 29 out. 2024.
- NSSF. *Why Your Range Should be Using HEPA Filter*. 2017. Disponível em: <https://www.nssf.org/articles/why-your-range-should-be-using-hepa-filters/>. Acesso em: 29 out. 2024.
- OKKENHAUG, G.; GEBHARDT, K. A. G.; AMSTAETTER, K.; BUE, H.L.; HERZEL, H.; MARIUSSEN, E.; ALMÅS, Å. R.; CORNELISSEN, G.; BREEDVELD, G.D.; RASMUSSEN, G.; MULDER, J. Antimony (Sb) and lead (Pb) in contaminated shooting range soils: Sb and Pb mobility and immobilization by iron based sorbents, a field study. *J Hazard Mater*, v. 307, p. 336-43, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.005>
- OLMEZ, I.; KOTRA, J. P.; LOWERY, S.; ZOLLER, W. H. Airborne lead and trace elements in an indoor shooting range: A study of the DC National Guard armory pistol range. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 4, p. 447-452, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5620040404>
- OMS. *Envenenamento por chumbo mata cerca de 1 milhão de pessoas todos os anos*. Organização Mundial da Saúde. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/10/1804252#:~:text=A%20cada%20ano%2C%20cerca%20de,elemento%20qu%C3%ADrico%20podem%20ser%20irrevers%C3%ADveis>. Acesso em: dia Out. 2024.
- RAABE, S. *Bullet recycler gets lead out*. Denver Post. 2007.
- RODRÍGUEZ-SEIJO, A.; LAGO-VILA, M.; ANDRADE, M. L.; VEGA, F. A. Pb pollution in soils from a trap shooting range and the phytoremediation ability of *Agrostis capillaris*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, p. 1312–1323, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5340-7>

- SÁNCHEZ-CASTRO, I.; MOLINA, L.; PRIETO-FERNÁNDEZ, M.; SEGURA, A. Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil - Remediation techniques applied in real soil-contamination events. *Heliyon*, v. 9, n. 6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>
- SANDERSON, P.; QI, F.; SESHADRI, B.; WIJAYAWARDENA, A.; NAIDU, R. Contamination, Fate and Management of Metals in Shooting Range Soils—a Review. *Current Pollution*, v. 4, p. 175–187, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0089-5>
- SHARMA, A.; SACHDEVA, S. Cadmium toxicity and its phytoremediation: A review. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, v. 9, 395–405, 2015. Disponível em: <https://www.ijser.org/researchpaper/Cadmium-Toxicity-And-Its-Phytoremediation-A-Review.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.
- SHARMA, J. K.; KUMAR, N.; SINGH, N. P.; SANTAL, A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1076876, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- SHIN, D. Y.; LEE, S. M.; JANG, Y.; LEE, J.; LEE, C. M.; CHO, E.; SEO, Y. R. Adverse Human Health Effects of Chromium by Exposure Route: A Comprehensive Review Based on Toxicogenomic Approach. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 24, n. 4, p. 3410, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24043410>
- SORVARI, J.; ANTIKAINEN, R.; KOSOLA, M.; HOKKANEN, P.; HAAVISTO, T. Eco-efficiency in contaminated land management in Finland – Barriers and development needs. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 5, p. 1715-1727, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.002>
- TABELIN, C. B.; IGARASHI, T.; VILLACORTE-TABELIN, M.; PARK, I.; OPIISO, E. M.; ITO, M.; HIROYOSHI, N. Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: A review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies. *Science of The Total Environment*, v. 645, p. 1522-1553, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.103>
- TAN, H. W.; PANG, Y. L.; LIM, S.; CHONG, W. C. A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, v. 30, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043>
- U.S. EPA. *Best management practices for lead at outdoor shooting ranges*. New York, 2005. 86 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/lead/best-management-practices-lead-outdoor-shooting-ranges>. Acesso em: 02 out. 2024.
- U.S. EPA.. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites*. EPA/ 540/S-01/500. Office of Research and Development, Washington, 2001. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa_540_s01_500.pdf. Acesso em: 02 out. 2024.
- ZHU, Y.; CHE, R.; TU, B.; MIAO, J.; LU, X.; LI, J.; ZHU, Y.; WANG, F. Contamination and remediation of contaminated firing ranges—an overview. *Frontiers in Environmental Science*, v. 12, p. 1352603, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1352603>